

BAB IV

HASIL ANALISIS

4.1 Data Perencanaan

Data perencanaan yang digunakan dalam perancangan Gedung SMP 15 Jakarta Selatan diperoleh melalui studi dokumen yang berkaitan dengan bangunan tersebut. Data ini digunakan sebagai dasar dalam proses analisis dan perencanaan struktur bangunan. Adapun data umum bangunan yang digunakan dalam perencanaan adalah sebagai berikut.

| | |
|-----------------|---|
| Nama Proyek | : Pembangunan Gedung SMP 15 Jakarta Selatan |
| Lokasi Proyek | : Jl. KH. Ahmad Dahlan, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan, DKI Jakarta |
| Jenis Bnagunan | : Beton Bertulang |
| Fungsi Bangunan | : Sekolah |
| Luas Bangunan | : ± 943 m ² |
| Tinggi Bangunan | : ± 22,95 m |
| Jumlah Lantai | : 5 Lantai + 1 Rooftop |

4.2 Preliminary Desain

Pada tahap preliminary design, dilakukan penentuan dimensi awal elemen struktur bangunan dengan mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019 yang membahas persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung beserta penjelasannya.

4.2.1 Preliminary Desain Balok

1. Perhitungan dimensi balok induk
 - a. Balok bentang 8000 mm, dengan mutu baja BJT 420B (fy 420 Mpa), maka:

$$h_{min} \geq \frac{L}{12}$$

$$h_{min} \geq \frac{8000}{12}$$

$$h_{min} \geq 500 \text{ mm}$$

$$h_{pakai} = 500 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1}{2} \times h$$

$$b = \frac{1}{2} \times 500$$

$$b = 250 \text{ mm}$$

$$b_{pakai} = 450 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi balok sebesar 500×450 mm. Selanjutnya dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6.1, dengan persyaratan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} d &= h - \text{selimut beton} - \text{\textcircled{ø}} \text{ sengkang} - \frac{1}{2} \text{\textcircled{ø}} \text{ tul. Utama} \\ &= 500 - 40 - 10 - 9,5 \\ &= 440,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_n &= L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_1}{2} \\ &= 8000 - \frac{750}{2} - \frac{750}{2} \\ &= 7250 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$1) \quad L_n > 4d$$

$$7250 \text{ mm} > 4 \times 440,5 \text{ mm}$$

$$7250 \text{ mm} > 1762 \text{ mm}$$

→ **OK**

$$2) \quad b \geq 250 \text{ mm}$$

$$450 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm}$$

→ **OK**

$$b \geq 0,3h$$

$$450 \text{ mm} \geq 0,3 \times 500 \text{ mm}$$

$$450 \text{ mm} \geq 150 \text{ mm}$$

→ **OK**

$$3) \quad b < c_2$$

$$450 \text{ mm} < 750 \text{ mm}$$

→ **OK**

$$b < 0,75 c_1$$

$$450 \text{ mm} < 0,75 \times 750 \text{ mm}$$

$$450 \text{ mm} < 562,5 \text{ mm}$$

→ **OK**

- b. Balok bentang 4500 mm, dengan mutu baja BjTS 420B (fy 420 Mpa),
maka:

$$h_{min} \geq \frac{L}{12}$$

$$h_{min} \geq \frac{4500}{12}$$

$$h_{min} \geq 281,25 \text{ mm}$$

$$h_{pakai} = 350 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1}{2} \times h$$

$$b = \frac{1}{2} \times 350$$

$$b = 175 \text{ mm}$$

$$b_{pakai} = 300 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi balok sebesar 350 × 300 mm. Selanjutnya dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6.1, dengan persyaratan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} d &= h - \text{selimut beton} - \varnothing \text{ sengkang} - \frac{1}{2} \varnothing \text{ tul. Utama} \\ &= 350 - 40 - 10 - 9,5 \\ &= 290,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_n &= L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_1}{2} \\ &= 4500 - \frac{750}{2} - \frac{750}{2} \\ &= 3750 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1) \quad L_n &> 4d \\ 3750 \text{ mm} &> 4 \times 290,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$3750 \text{ mm} > 1162 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

$$2) \quad b \geq 250 \text{ mm}$$

$$300 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

$$b \geq 0,3h$$

$$300 \text{ mm} \geq 0,3 \times 350 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{llll}
 300 \text{ mm} & \geq 105 \text{ mm} & \rightarrow & \mathbf{OK} \\
 3) \quad b & < c_2 & & \\
 300 \text{ mm} & < 750 \text{ mm} & \rightarrow & \mathbf{OK} \\
 b & < 0,75 c_1 & & \\
 300 \text{ mm} & < 0,75 \times 750 \text{ mm} & & \\
 300 \text{ mm} & < 562,5 \text{ mm} & \rightarrow & \mathbf{OK}
 \end{array}$$

2. Perhitungan dimensi balok anak

- a. Balok bentang 4500 mm, dengan mutu baja BjTS 420B (f_y 420 Mpa),
maka:

$$\begin{aligned}
 h_{min} &\geq \frac{L}{12} \\
 h_{min} &\geq \frac{4500}{12} \\
 h_{min} &\geq 281,25 \text{ mm} \\
 h_{pakai} &= 400 \text{ mm} \\
 b &= \frac{1}{2} \times 400 \\
 b &= \frac{1}{2} \times 400 \\
 b &= 200 \text{ mm} \\
 b_{pakai} &= 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi balok sebesar 400×250 mm. Selanjutnya dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6.1, dengan persyaratan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 D &= h - \text{selimut beton} - \emptyset \text{ sengkang} - \frac{1}{2} \emptyset \text{ tul. Utama} \\
 &= 400 - 40 - 10 - 9,5 \\
 &= 340,5 \text{ mm} \\
 L_n &= L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_1}{2} \\
 &= 4500 - \frac{500}{2} - \frac{500}{2} \\
 &= 4000 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- 1) $L_n > 4d$
 $4000\text{mm} > 4 \times 340,5 \text{ mm}$
 $4000\text{mm} > 1362 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$
- 2) $b \geq 250 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$
 $b \geq 0,3h$
 $250 \text{ mm} \geq 0,3 \times 400 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} \geq 120 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$
- 3) $b < c_2$
 $250 \text{ mm} < 500 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$
 $b < 0,75 c_1$
 $250 \text{ mm} < 0,75 \times 500 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} < 375 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$

3. Perhitungan dimensi balok kantilever

- a. Balok bentang 2200 mm, dengan mutu baja BjTS 420B (f_y 420 Mpa), maka:

$$h_{min} \geq \frac{L}{8}$$

$$h_{min} \geq \frac{2200}{8}$$

$$h_{min} \geq 275 \text{ mm}$$

$$h_{pakai} = 400 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1}{2} \times 400$$

$$b = \frac{1}{2} \times 400$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$b_{pakai} = 300 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi balok sebesar 400×300 mm. Selanjutnya dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6.1, dengan persyaratan sebagai berikut :

$$d = h - \text{selimut beton} - \text{\textcircled{O}} \text{ sengkang} - \frac{1}{2} \text{\textcircled{O}} \text{ tul. Utama}$$

$$\begin{aligned}
 &= 400 - 40 - 10 - 9,5 \\
 &= 340,5 \text{ mm} \\
 L_n &= L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_1}{2} \\
 &= 4500 - \frac{500}{2} - \frac{500}{2} \\
 &= 4000 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

1) $L_n > 4d$
 $4000 \text{ mm} > 4 \times 340,5 \text{ mm}$
 $4000 \text{ mm} > 1362 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$

2) $b \geq 250 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$
 $b \geq 0,3h$
 $250 \text{ mm} \geq 0,3 \times 400 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} \geq 120 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$

3) $b < c_2$
 $250 \text{ mm} < 500 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$
 $b < 0,75 c_1$
 $250 \text{ mm} < 0,75 \times 500 \text{ mm}$
 $250 \text{ mm} < 375 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengecekan yang telah dilakukan terhadap elemen struktur, selanjutnya disusun rekapitulasi hasil analisis untuk mempermudah dalam mengevaluasi kesesuaian dimensi dan kapasitas elemen terhadap ketentuan yang berlaku. Rekapitulasi ini memuat informasi mengenai dimensi elemen, panjang bentang, serta hasil pengecekan terhadap syarat-syarat perencanaan yang telah ditetapkan. Dengan adanya tabel rekapitulasi ini, dapat diketahui secara ringkas apakah setiap elemen struktur telah memenuhi kriteria perencanaan yang ditandai dengan keterangan hasil pengecekan. Adapun hasil rekapitulasi tersebut disajikan pada **Tabel 4.1** berikut:

Tabel 4. 1 Rekapitulasi *Preliminary* Desain Balok

| No | Tipe Balok | Bentang (L) | Bentang bersih (Ln) | Dimensi (mm) | | | | Syarat Tinggi Efektif Balok | Syarat Lebar 1 Efektif Balok | Syarat Lebar 2 Efektif Balok |
|----|------------|-------------|---------------------|--------------|--------|-----------|-------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | Tinggi Min | Tinggi | Lebar Min | Lebar | | | |
| 1 | TB 1 | 8000 | 7250 | 457,073 | 600 | 228,537 | 350 | OK | OK | OK |
| 2 | TB 2 | 4500 | 3750 | 424,809 | 500 | 212,405 | 450 | OK | OK | OK |
| 3 | B1 | 8000 | 7250 | 579,692 | 650 | 289,846 | 400 | OK | OK | OK |
| 4 | B1* | 4500 | 3750 | 474,391 | 650 | 237,195 | 400 | OK | OK | OK |
| 5 | B2 | 4500 | 3750 | 368,064 | 450 | 184,064 | 300 | OK | OK | OK |
| 6 | BK2 | 2200 | 1700 | 374,686 | 400 | 187,343 | 300 | OK | OK | OK |
| 7 | BL | 2500 | 2200 | 324,485 | 450 | 162,242 | 250 | OK | OK | OK |
| 8 | BA2 | 4500 | 4000 | 237,552 | 350 | 118,776 | 250 | OK | OK | OK |
| 9 | BA1 | 4500 | 4000 | 318,956 | 450 | 159,478 | 250 | OK | OK | OK |

4.2.2 Preliminary Desain Kolom

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Data perencanaan | = |
| Tipe Kolom | = K1 |
| Lokasi yang ditinjau | = Lantai 1 (As H'3) |
| Bentang Balok | = 4500 mm |
| Tinggi Kolom | = 4000 mm |
| h balok B1 | = 500 mm |
| b balok B1 | = 450 mm |
| Mutu tulangan (f_y) | = 420 MPa |
| Mutu beton (f'_c) | = 25 MPa |

Untuk mencari dimensi kolom dalam perencanaan ini disesuaikan dengan SNI 2847-2019 Pasal 18.7.2 dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{I_{Kolom}}{L_{Kolom}} \geq \frac{I_{Balok}}{L_{Balok}}$$

$$\frac{1}{12} \times \frac{b_{Kolom}}{L_{Kolom}} \times h_{Kolom}^3 \geq \frac{1}{12} \times \frac{b_{Balok}}{L_{Balok}} \times h_{Balok}^3$$

$$\frac{1}{12} \times \frac{b_{Kolom}}{4000} \times h_{Kolom}^3 \geq \frac{1}{12} \times \frac{450}{4500} \times 500^3$$

$$h^4 \geq 50000000000$$

$$h \geq 472,871$$

$$h_{pakai} = 750$$

Jadi, didapatkan dimensi kolom yaitu 750 x 750 mm.

Tinjauan pelat lantai dengan luasan $76,5 \text{ m}^2$, dengan mutu baja BjTS 420B (f_y 420 Mpa), maka

- Beban merata

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| Beban pelat | = 2,943 kN/m ² |
| Beban SIDL | = 2,727 kN/m ² |
| Beban hidup | = 4,79 kN/m ² |
| Beban ultimit | = 1,2DL + 1,6LL |
| | = 1,2 x (2,943 + 2,727) + 1,6 x 4,79 |
| | = 14,468 kN/m ² |

2. Beban aksial

$$\begin{aligned}
 \text{Beban aksial ultimit} &= Q_u \times A \\
 &= 14,468 \times 76,5 \\
 &= 1106,7965 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Tinjauan pelat atap dengan luasan $76,5 \text{ m}^2$, dengan mutu baja BJTS 420B (f_y 420 Mpa), maka

3. Beban merata

$$\begin{aligned}
 \text{Beban pelat} &= 2,59 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban SIDL} &= 1,467 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban hidup} &= 4,79 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban ultimit} &= 1,2DL + 1,6LL \\
 &= 1,2 \times (2,59 + 1,467) + 1,6 \times 4,79 \\
 &= 12,533 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

4. Beban aksial

$$\begin{aligned}
 \text{Beban aksial ultimit} &= Q_u \times A \\
 &= 12,533 \times 76,5 \\
 &= 958,75 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

P_u kumulatif pada 5 lantai + 1 dak sebesar 6492732,1 N.

Estimasi luas penampang bruto kolom

$$\begin{aligned}
 A_g &= \frac{P_u}{0,8\Phi \times (0,85 \times 'c)} \\
 A_g &= \frac{6492732,2}{0,8 \times 0,65 \times (0,85 \times 25)} \\
 &= 587577,57 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B = H &= \sqrt{A_g} \\
 &= \sqrt{587577,57} \\
 &= 766,536 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$B_{pakai} = 750 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi kolom sebesar 750×750 mm. Selanjutnya dilakukan pengecekan kontrol sesuai dengan persyaratan sebagai berikut :

1. $B > 300$
 $750 > 300 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$
2. $B > 0,4H$
 $750 > 0,4 \times 750$
 $750 > 300 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$

Berdasarkan hasil perhitungan *preliminary design* kolom yang telah dilakukan, selanjutnya disusun rekapitulasi untuk mempermudah dalam mengevaluasi kesesuaian dimensi kolom terhadap ketentuan perencanaan yang berlaku. Rekapitulasi ini memuat informasi mengenai tipe kolom, dimensi balok yang ditumpu, tinggi kolom, serta hasil perbandingan antara dimensi minimum yang disyaratkan dengan dimensi kolom yang direncanakan. Melalui tabel rekapitulasi ini, dapat diketahui apakah setiap kolom telah memenuhi persyaratan desain yang ditetapkan. Adapun hasil rekapitulasi *preliminary design* kolom disajikan pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Rekapitulasi *Preliminary* Desain Kolom

| No | Tipe Kolom | Bentang Balok | Tinggi Kolom | Dimensi Balok | | h Kolom Minimum | Dimensi Kolom | | Syarat Kolom 1 | Syarat Kolom 2 |
|----|------------|---------------|--------------|---------------|-----|-----------------|---------------|-----|----------------|----------------|
| | | | | h | b | | h | b | | |
| 1 | K1 | 8000 | 4000 | 500 | 450 | 472,871 | 750 | 750 | OK | OK |
| 2 | K2 | 4500 | 4000 | 350 | 300 | 361,881 | 400 | 400 | OK | OK |

4.2.3 Preliminary Pelat

Perhitungan pelat lantai dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah. Perencanaan pelat tersebut mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019.

1. Perhitungan pelat lantai

Perhitungan pelat lantai dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah. Perencanaan pelat tersebut mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019.

Data perencanaan :
 Tipe Pelat : S1
 Lokasi yang ditinjau : Lantai 1 (E'-F'/6)
 Bentang sumbu panjang (Ly) : 4500 mm
 Bentang sumbu pendek (Lx) : 4000 mm
 Mutu tulangan (Fy) : 420 Mpa

Penentuan jenis pelat lantai,

$$\text{a. } \frac{L_y}{L_x} \geq 2 \text{ Pelat 1 Arah} \qquad \frac{L_y}{L_x} < 2 \text{ Pelat 2 Arah}$$

$$\frac{4500}{4000} < 2$$

$$1,125 < 2 \qquad \textbf{Pelat 2 Arah}$$

$$\text{b. } L_x < 0,4L_y \text{ Pelat 1 Arah} \qquad L_x > 0,4L_y \text{ Pelat 2 Arah}$$

$$4000 > 0,4 \times 4500$$

$$4000 > 1800 \qquad \textbf{Pelat 2 Arah}$$

Penentuan tebal minimal pelat,

$$\frac{L_x}{33} = \frac{4000}{33} = 121,212 \text{ mm}$$

$$Tebal_{pakai} = 130 \text{ mm}$$

Maka, tebal pelat S1 yang digunakan pada perencanaan ini yaitu 130 mm.

2. Perhitungan pelat atap

Perhitungan pelat lantai dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah. Perencanaan pelat tersebut mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019.

Data perencanaan :

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Tipe pelat | : S Atap |
| Lokasi yang ditinjau | : Lantai Atap (0 - A') |
| Bentang sumbu panjang (Ly) | : 3000 mm |
| Bentang sumbu pendek (Lx) | : 2500 mm |
| Mutu tulangan (Fy) | : 420 Mpa |

Penentuan jenis pelat lantai,

$$\text{a. } \frac{Ly}{Lx} \geq 2 \text{ Pelat 1 Arah} \qquad \frac{Ly}{Lx} < 2 \text{ Pelat 2 Arah}$$

$$\frac{3000}{2500} < 2$$

$$1,2 < 2 \qquad \textbf{Pelat 2 Arah}$$

$$\text{b. } Lx < 0,4Ly \text{ Pelat 1 Arah} \quad Lx > 0,4Ly \text{ Pelat 2 Arah}$$

$$2500 > 0,4 \times 3000$$

$$2500 > 1200 \qquad \textbf{Pelat 2 Arah}$$

Penentuan tebal minimal pelat,

$$\frac{Lx}{33} = \frac{2500}{33} = 75,758 \text{ mm}$$

$$Tebal_{pakai} = 120 \text{ mm}$$

Maka, tebal pelat S Atap yang digunakan pada perencanaan ini yaitu 120 mm.

Perencanaan awal (preliminary design) pelat dilakukan untuk menentukan dimensi tebal pelat yang sesuai berdasarkan bentang dan kondisi pembebanan yang bekerja. Penentuan tebal pelat ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, serta kenyamanan struktur terhadap lendutan. Dalam tahap ini, tebal pelat ditentukan dengan mempertimbangkan rasio bentang terhadap tebal serta ketentuan yang berlaku, sehingga diperoleh dimensi awal yang efisien dan aman untuk digunakan pada tahap perencanaan selanjutnya. Hasil rekapitulasi preliminary design pelat untuk masing-masing tipe disajikan pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Rekapitulasi *Preliminary* Desain Pelat

| Tipe | Bentang (mm) | | Tebal Pelat (mm) |
|----------|-----------------|------|---------------------|
| | Lx | Ly | |
| S1 | 4500 | 4000 | 135 |
| S2 | 4500 | 4500 | 150 |
| S Bordes | 4500 | | 130 |
| S Tangga | 4500 | | 130 |
| S Atap | 3000 | 2500 | 120 |

4.2.4 *Preliminary* Tangga

Perhitungan tangga dalam perencanaan ini meliputi elemen pelat tangga dan bordes. Perencanaan tangga tersebut mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019.

1. Perhitungan optrede dan aantrede

$$L \text{ ruang tangga} = 5600 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Optrede rencana} &= 150 - 200 \text{ mm} \\ &= 167 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aantrede rencana} &= 280 - 300 \text{ mm} \\ &= 300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Elevasi 1} = 0 \text{ mm}$$

$$\text{Elevasi 2} = 2000 \text{ mm}$$

$$\text{Elevasi 3} = 4000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah anak tangga (n)} &= \frac{\text{Elevasi 2}}{\text{Aptrede rencana}} - 1 \\ &= \frac{2000}{167} - 1 \\ &= 11 = 12 \text{ anak tangga} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Optrede pakai} &= \frac{\text{Elevasi 2}}{\text{Jumlah anak tangga}} \\ &= \frac{2000}{12} \end{aligned}$$

$$= 166,7 \text{ mm}$$

$$\text{Aantrede pakai} = 300 \text{ mm}$$

Syarat,

$$590 \text{ mm} \leq 2x \text{ Optrede} + \text{Aantrede} \leq 650 \text{ mm}$$

$$2 \times 166,7 + 300 = 633,333 \text{ mm}$$

$$590 \text{ mm} \leq \mathbf{633,333} \leq 650 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

Maka, optrede dan aantrede yang digunakan pada perencanaan ini yaitu 166,7 mm dan 300 mm.

2. Perhitungan dimensi bordes dan tangga

$$\begin{aligned} \text{L tangga} &= \text{Jumlah anak tangga} \times \text{aantrede pakai} \\ &= 11 \times 300 \\ &= 3300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{L bordes} &= \text{L ruang tangga} - \text{L tangga} \\ &= 5600 - 3300 \\ &= 2300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tebal pelat tangga} &= \frac{\text{L Tangga}}{27} \\ &= \frac{3300}{27} \\ &= 122,222 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Tebal pelat tangga pakai} = 130 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Tebal anak tangga} &= \frac{\text{Optrede pakai}}{2} \\ &= \frac{166,7}{2} \\ &= 83,333 = 83 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Tebal pelat bordes} = 130 \text{ mm}$$

4.3 Pembebanan

Tahap awal analisis struktur dilakukan dengan merencanakan pembebanan pada bangunan. Beban yang diperhitungkan meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, serta beban hujan.

4.3.1 Beban Mati

Beban mati dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu berat sendiri struktur dan beban mati tambahan (*super dead load*). Berat sendiri struktur telah diperhitungkan secara otomatis dalam pemodelan menggunakan ETABS, sedangkan beban mati tambahan merupakan beban merata yang bekerja pada elemen pelat dan dinding. Perhitungan beban mati dalam perencanaan struktur mengacu pada SNI 1727:2020. Jenis beban mati tambahan ini selanjutnya diperhitungkan dalam perencanaan struktur sebagai berikut:

1. Beban mati tambahan (SIDL) pelat lantai

| | |
|-------------------|---------------------------|
| a. Partisi (1) | = 0,72 kN/m ² |
| b. Keramik | = 0,167 kN/m ² |
| c. Spesi (0,03) | = 0,618 kN/m ² |
| d. Pasir (0,05) | = 0,785 kN/m ² |
| e. MEP | = 0,3 kN/m ² |
| f. Plafond | = 0,088 kN/m ² |
| g. Rangka Plafond | = 0,049 kN/m ² |
| Total QSIDL | = 2,727 kN/m ² |
| Total QSIDL (1) | = 2,007 kN/m ² |

(1) SNI 1721:2020 pasal 4.3.2 untuk ruangan dengan beban hidup $\geq 3,83$ kN/m², beban partisi tidak perlu disertakan.

2. Beban mati tambahan (SIDL) pelat atap

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| a. Spesi (0,03) | = 0,618 kN/m ² |
| b. <i>Waterproof</i> (0,02) | = 0,412 kN/m ² |
| c. MEP | = 0,3 kN/m ² |
| d. Plafond | = 0,088 kN/m ² |
| e. Rangka Plafond | = 0,049 kN/m ² |
| Total QSIDL | = 1,467 kN/m ² |

3. Beban mati tambahan (SIDL) pelat tangga

| | |
|----------------|---------------------------|
| a. Anak tangga | = 1,954 kN/m ² |
| b. Keramik | = 0,167 kN/m ² |

- c. Spesi (0,03) = 0,618 kN/m²
- d. Pasir (0,05) = 0,785 kN/m²
- Total QSIDL = 3,524 kN/m²
- 4. Beban mati tambahan (SIDL) pelat bordes
 - a. Keramik = 0,167 kN/m²
 - b. Spesi (0,03) = 0,618 kN/m²
 - c. Pasir (0,05) = 0,785 kN/m²
 - Total QSIDL = 1,57 kN/m²
- 5. Beban Dinding
 - Hebel = $\frac{1}{2}$ x Bata Merah (Clay Brick)
 - = 0,5 x 1,87
 - = 0,935 kN/m²
 - Plesteran = 0,24 kN/m²
 - Berat Dinding = 0,935 + 0,48 = 1,415 kN/m²

4.3.2 Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang timbul akibat aktivitas dan penggunaan bangunan oleh penghuni, yang tidak termasuk berat sendiri struktur maupun beban akibat kondisi lingkungan seperti gempa. Penentuan besarnya beban hidup dalam perencanaan struktur mengacu pada SNI 1727:2020. Analisis beban hidup dalam perencanaan ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Beban hidup pada lantai
 - a. Ruang Kelas = 3,83 kN/m²
 - b. Koridor Lantai 1 = 4,79 kN/m²
 - c. Ruang Kantor = 2,4 kN/m²
 - d. Kantin = 4,79 kN/m²
 - e. Perpustakaan = 2,87 kN/m²
 - f. Tangga = 4,79 kN/m²
 - g. Bordes = 4,79 kN/m²
 - h. Lab Komputer = 4,79 kN/m²

| | | |
|----|--------------------------|--------------------------|
| i. | Lab IPA | = 2,87 kN/m ² |
| j. | Koridor di Atas Lantai 1 | = 3,83 kN/m ² |
| k. | Toilet | = 2,87 kN/m ² |
| l. | Ruang Serbaguna | = 1,5 kN/m ² |
| m. | Mushola | = 1,5 kN/m ² |
| n. | Roof Garden | = 5 kN/m ² |
| o. | Dak Beton | = 1,2 kN/m ² |

4.3.3 Beban Angin

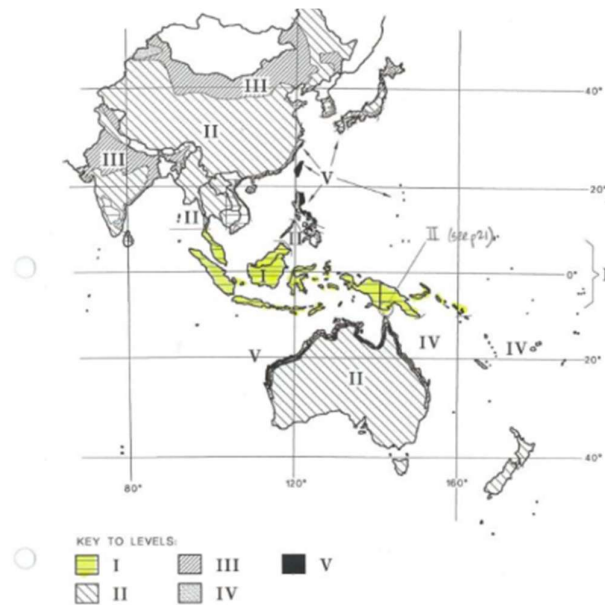
Perencanaan beban angin dilakukan berdasarkan parameter yang mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26, dengan rincian sebagai berikut.

1. Metode sistem penahan gaya angin

Pada perencanaan ini, metode yang digunakan adalah Prosedur Amplop untuk bangunan bertingkat rendah (SPGAU nomor 2) sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1727:2020.

2. Parameter beban angin

Beban angin merupakan salah satu beban lateral yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan struktur bangunan gedung. Besarnya beban angin dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kecepatan angin dasar, ketinggian bangunan, serta kondisi lingkungan di sekitar lokasi bangunan. Penentuan parameter beban angin dalam perencanaan ini mengacu pada SNI 1727:2020, yang mengklasifikasikan wilayah berdasarkan kecepatan angin dasar seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4. 1 Peta Angin

(Sumber : Peta Angin Australia HB 212-2002)

Tabel 4. 4 Tabel Kecepatan Angin Rencana (V_r) Berdasarkan Tingkat Risiko Wilayah (*Handbook Level*)

| <i>Handbook Level</i> | <i>Description</i> | <i>Equation for V_r</i> | V_{60} | V_{600} |
|-----------------------|---|--------------------------------------|----------|-----------|
| I | Strong thunderstorms and monsoon winds | $(70 - 56R^{-0.1})$ | 32 | 40 |
| II | Moderately severe thunderstorms and extra-tropical gales | $(67 - 41R^{-0.1})$ | 39 | 45 |
| III | Severe thunderstorms and moderate or weakening typhoons/tropical cyclones | $(106 - 92R^{-0.1})$ | 44 | 57 |
| IV | Strong typhoons/tropical cyclones | $(122 - 104R^{-0.1})$ | 52 | 66 |

| <i>Handbook Level</i> | <i>Description</i> | <i>Equation for Vr</i> | <i>V₆₀</i> | <i>V₆₀₀</i> |
|-----------------------|---|------------------------|-----------------------|------------------------|
| V | <i>Very strong typhoons/tropical cyclones</i> | $(156 - 142R^{-0.1})$ | 60 | 80 |

(Sumber: HB 212-2002 (*Handbook of Wind Actions*))

Berdasarkan peta kecepatan angin pada HB 212:2002, wilayah DKI Jakarta termasuk dalam kategori daerah dengan kecepatan angin rencana 32 m/s yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan struktur terhadap beban angin. Nilai kecepatan angin tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam analisis beban angin sesuai dengan ketentuan yang berlaku

3. Faktor Arah Angin

Faktor arah angin merupakan salah satu parameter penting dalam perhitungan beban angin pada struktur bangunan. Faktor ini digunakan untuk memperhitungkan kemungkinan arah datangnya angin terhadap bangunan, sehingga dapat merepresentasikan kondisi pembebanan yang lebih realistis. Nilai faktor arah angin (K_a) ditentukan berdasarkan jenis struktur dan karakteristik elemen yang menerima beban angin, seperti sistem penahan gaya angin utama maupun komponen dan klading. Penentuan nilai (K_a) mengacu pada ketentuan standar yang berlaku, sehingga hasil analisis beban angin yang diperoleh dapat memenuhi aspek keamanan dan keandalan struktur. Nilai faktor arah angin yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Faktor Arah Angin

| Tipe Struktur | Faktor arah angin (K_a) |
|---|-----------------------------|
| Bangunan gedung | |
| Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) | 0,85 |
| Komponen dan Klading (K&K) | 0,85 |
| Atap lengkung | 0,85 |
| Kubah berbentuk bundar | 1,0 ^a |
| Cerobong, tangki, dan struktur serupa | |
| Persegi | 0,90 |
| Segi enam | 0,95 |
| Segi delapan | 1,0 ^a |
| Bundar | 1,0 ^a |

| Tipe Struktur | Faktor arah angin (K_d) |
|---|-----------------------------|
| Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat | 0,85 |
| Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal | 0,85 |
| Rangka batang menara | |
| Segitiga, persegi, atau persegi panjang | 0,85 |
| Semua penampang lainnya | 0,95 |

(Sumber: SNI 1727:2020)

Faktor arah angin ditentukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Tabel 26.6-1, yang disesuaikan dengan tipe struktur bangunan. Pada bangunan ini digunakan tipe struktur dengan Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU), sehingga diperoleh nilai faktor arah angin sebesar 0,85.

4. Kategori Eksposur
Penentuan kategori eksposur angin dilakukan dengan mempertimbangkan tinggi atap rata-rata ≤ 30 ft (9,1 m) serta karakteristik kekasaran permukaan tanah yang dipengaruhi oleh kondisi topografi setempat. Berdasarkan kondisi lingkungan perkotaan, bangunan ini diklasifikasikan dalam Eksposur B sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.7.2.
5. Faktor Topografi
Kondisi situs dan lokasi bangunan SMPN 15 Jakarta Selatan tidak berada pada area dengan perbukitan atau tebing curam, sehingga tidak memenuhi kriteria yang disyaratkan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.8.1. Oleh karena itu, nilai faktor topografi yang digunakan adalah $K_{zt} = 1,0$.
6. Faktor Elevasi Permukaan Tanah
Faktor elevasi permukaan tanah (K_e) merupakan salah satu parameter dalam perhitungan beban angin yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh ketinggian lokasi bangunan terhadap permukaan laut. Semakin tinggi elevasi suatu lokasi, maka densitas udara cenderung menurun sehingga tekanan angin yang bekerja pada struktur juga mengalami perubahan. Oleh karena itu, faktor elevasi (K_e) digunakan sebagai koefisien penyesuaian agar perhitungan beban angin lebih akurat dan sesuai dengan kondisi geografis lokasi bangunan. Nilai

(K_e) ditentukan berdasarkan ketinggian terhadap permukaan laut (*sea level*) sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 6 Faktor Elevasi Permukaan Tanah, K_e

| Elevasi tanah di atas permukaan laut (<i>Sea Level</i>) | | Faktor elevasi permukaan tanah (K_e) |
|---|---------|--|
| ft | m | |
| < 0 | < 0 | Lihat catatan 2 |
| 0 | 0 | 1,00 |
| 1.000 | 305 | 0,96 |
| 2.000 | 610 | 0,93 |
| 3.000 | 914 | 0,90 |
| 4.000 | 1.219 | 0,86 |
| 5.000 | 1.524 | 0,83 |
| 6.000 | 1.829 | 0,80 |
| > 6.000 | > 1.829 | Lihat catatan 2 |

(Sumber: SNI 1727:2020)

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.9, faktor elevasi permukaan tanah K_e yang digunakan untuk menyesuaikan densitas udara ditentukan sesuai dengan Tabel 26.9-1. Namun demikian, untuk seluruh kondisi elevasi, nilai K_e dapat diambil sebesar 1,0.

7. Tekanan kecepatan (K_z)

Koefisien eksposur tekanan kecepatan (K_z) merupakan parameter yang digunakan dalam perhitungan beban angin untuk memperhitungkan pengaruh ketinggian dan kondisi lingkungan sekitar terhadap kecepatan angin yang bekerja pada struktur. Nilai (K_z) dipengaruhi oleh kategori eksposur, seperti Eksposur B, C, dan D, yang menggambarkan tingkat kekasaran permukaan tanah di sekitar bangunan. Semakin tinggi posisi suatu titik dari permukaan tanah, maka nilai (K_z) cenderung meningkat, yang menunjukkan bahwa kecepatan angin semakin besar pada ketinggian yang lebih tinggi. Nilai koefisien eksposur tekanan kecepatan (K_z) ditentukan berdasarkan ketinggian dan kategori eksposur sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4. 7 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan, K_h dan K_z

| Ketinggian di atas permukaan tanah | | Eksposur B | Eksposur C | Eksposur D |
|------------------------------------|-------|--------------------------|------------|------------|
| ft | m | | | |
| 0–15 | 0–4,6 | 0,57 (0,70) ^a | 0,85 | 1,03 |

| Ketinggian di atas permukaan tanah | | Eksposur B | Eksposur C | Eksposur D |
|------------------------------------|-------|--------------------------|------------|------------|
| 20 | 6,1 | 0,62 (0,70) ^a | 0,90 | 1,08 |
| 25 | 7,6 | 0,66 (0,70) ^a | 0,94 | 1,12 |
| 30 | 9,1 | 0,70 | 0,98 | 1,16 |
| 40 | 12,2 | 0,76 | 1,04 | 1,12 |
| 50 | 15,2 | 0,81 | 1,09 | 1,27 |
| 60 | 18,0 | 0,85 | 1,13 | 1,31 |
| 70 | 21,3 | 0,89 | 1,17 | 1,34 |
| 80 | 24,4 | 0,93 | 1,21 | 1,38 |
| 90 | 27,4 | 0,96 | 1,24 | 1,40 |
| 100 | 30,5 | 0,99 | 1,26 | 1,43 |
| 120 | 36,6 | 1,04 | 1,31 | 1,48 |
| 140 | 42,7 | 1,09 | 1,36 | 1,52 |
| 160 | 48,8 | 1,13 | 1,39 | 1,55 |
| 180 | 54,9 | 1,17 | 1,43 | 1,58 |
| 200 | 61,0 | 1,20 | 1,46 | 1,61 |
| 250 | 76,2 | 1,28 | 1,53 | 1,68 |
| 300 | 91,4 | 1,35 | 1,59 | 1,73 |
| 350 | 106,7 | 1,41 | 1,64 | 1,78 |
| 400 | 121,9 | 1,47 | 1,69 | 1,82 |
| 450 | 137,2 | 1,52 | 1,73 | 1,86 |
| 500 | 152,4 | 1,56 | 1,77 | 1,89 |

Gunakan 0,70 pada Pasal 28, Eksposur B, apabila $z < 30$ ft (9,1 m)
(Sumber: SNI 1727:2020)

$$K_z = 0,89 + \frac{22,95 - 21,3}{24,4 - 21,3} \times (0,93 - 0,89)$$

$$K_z = 0,911$$

Nilai koefisien eksposur tekanan kecepatan (K_z) pada ketinggian 22,95 m diperoleh melalui interpolasi linier dari Tabel 26.10-1 SNI 1727:2020, yaitu antara ketinggian 21,3 m dengan $K_z = 0,89$ dan 24,4 m dengan $K_z = 0,93$. Berdasarkan hasil interpolasi tersebut, diperoleh nilai $K_z = 0,911$.

8. Tekanan kecepatan velositas (q_z)

Nilai tekanan kecepatan (*velocity pressure*) ditentukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.10.2, dengan persamaan sebagai berikut.

$$q_z = 0,613 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2$$

$$q_z = 0,613 \times 0,911 \times 1 \times 0,85 \times 32^2$$

$$q_z = 486,069 \text{ N/m}^2 = 0,486 \text{ kN/m}^2$$

Syarat,

a. $qz1 \geq 0,77$

$0,486 < 0,77$

TIDAK OK

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 27.1.5, nilai tekanan angin tidak diperkenankan kurang dari $0,77 \text{ kN/m}^2$, sehingga nilai yang digunakan dalam perencanaan diambil sebesar $0,77 \text{ kN/m}^2$.

9. Faktor pengaruh hembusan angin (G)

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.2, untuk bangunan kaku atau struktur sejenis, nilai faktor efek hembusan angin dapat diambil sebesar 0,85.

10. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan internal ditentukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Tabel 26.13-1, sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

| Klasifikasi ketertutupan | Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan | Tekanan internal | Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) |
|----------------------------|---|------------------|--|
| Bangunan tertutup | Ao kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$ | Sedang | -0,18 -0,18 |
| Bangunan tertutup sebagian | $Ao > 1,1A_{oi}$ dan $Ao >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$ | Tinggi | -0,55 -0,55 |
| Bangunan terbuka sebagian | Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka | Sedang | -0,18 -0,18 |
| Bangunan terbuka | Setiap dinding minimal terbuka 80% | Diabaikan | 0,00 |

(Sumber: SNI 1727:2020)

Berdasarkan tabel tersebut, untuk bangunan dengan klasifikasi tertutup, nilai koefisien tekanan internal yang digunakan adalah sebesar -0,18.

11. Koefisien tekanan eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal (C_p) merupakan parameter yang digunakan dalam perhitungan beban angin untuk memperhitungkan distribusi tekanan angin yang bekerja pada permukaan luar bangunan. Nilai (C_p) dipengaruhi oleh bentuk bangunan, arah datangnya angin, serta perbandingan dimensi

bangunan (L/B). Koefisien ini digunakan untuk menentukan besarnya tekanan atau hisapan angin pada elemen struktur, baik pada dinding maupun atap, yang kemudian dikombinasikan dengan tekanan kecepatan angin seperti (qz) atau (qh). Penentuan nilai (C_p) mengacu pada ketentuan standar yang berlaku dan disesuaikan dengan kondisi geometrik bangunan. Nilai koefisien tekanan eksternal (C_p) yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

| Permukaan | L/B | C_p | Digunakan dengan |
|------------------------------|---------------|-------|------------------|
| Dinding di sisi angin datang | Seluruh nilai | 0,8 | qz |
| | 0 – 1 | -0,5 | qh |
| Dinding di sisi angin pergi | 2 | -0,3 | qh |
| | ≥ 4 | -0,2 | qh |
| Dinding tepi | Seluruh nilai | -0,7 | qh |

(Sumber: SNI 1727:2020)

$$L = 47,5$$

$$B = 20,5$$

$$L/B = 2,317$$

$$\text{Dinding sisi angin datang, } C_p = 0,80$$

$$\text{Dinding sisi angin pergi, } C_p = -0,30$$

$$\text{Dinding tepi, } C_p = -0,7$$

12. Tekanan angin (p) pada permukaan gedung

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 27.3.1, nilai tekanan angin (p) ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$p = q \times G \times C_p - q_i (GC_{pi})$$

- a. Dinding sisi angin datang

$$p = q \times G \times C_p - q_i (GC_{pi})$$

$$p = 0,77 \times 0,85 \times (-0,30) - 0,486 (-0,18)$$

$$p = -0,109 \text{ kN/m}^2$$

- b. Dinding sisi angin pergi

$$p = q \times G \times C_p - q_i (GC_{pi})$$

$$p = 0,77 \times 0,85 \times (-0,70) - 0,486 (-0,18)$$

$$p = -0,371 \text{ kN/m}^2$$

- c. Dinding sisi angin datang

$$p = q \times G \times C_p - q_i (GC_{pi})$$

$$p = 0,77 \times 0,85 \times 0,8 - 0,486 (-0,18)$$

$$p = 0,611 \text{ kN/m}^2$$

4.3.4 Beban Gempa

Perencanaan beban gempa struktur gedung SMPN 15 Jakarta Selatan dilakukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1726:2019. Analisis beban gempa dalam penelitian ini menggunakan metode respons spektrum yang dimodelkan melalui perangkat lunak ETABS. Dalam penerapannya, terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan sebagai dasar perhitungan beban gempa, antara lain sebagai berikut.

1. Kategori risiko

Penentuan kategori risiko bangunan merupakan salah satu tahapan penting dalam perencanaan struktur terhadap beban gempa. Kategori risiko digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat kepentingan suatu bangunan berdasarkan fungsi dan potensi dampak yang ditimbulkan apabila terjadi kegagalan struktur. Penetapan kategori ini akan mempengaruhi parameter perencanaan gempa, seperti faktor keutamaan dan tingkat keandalan struktur yang harus dipenuhi. Berdasarkan fungsi bangunan sebagai fasilitas pendidikan, yaitu gedung sekolah, maka bangunan ini termasuk dalam

kategori risiko tertentu sesuai dengan ketentuan standar yang berlaku. Klasifikasi kategori risiko bangunan tersebut disajikan pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4. 10 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

| Jenis Pemanfaatan | Kategori risiko |
|---|-----------------|
| <p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat • Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p> | IV |

(Sumber: SNI 1726:2019)

Penentuan kategori risiko bangunan merupakan tahap awal yang penting dalam perencanaan struktur tahan gempa karena berpengaruh terhadap besarnya faktor keutamaan dan tingkat keandalan struktur. Berdasarkan fungsi bangunan sebagai fasilitas pendidikan yang menampung banyak pengguna dan memiliki peran penting dalam pelayanan publik, maka gedung SMPN 15 Jakarta Selatan diklasifikasikan ke dalam kategori risiko IV sesuai dengan SNI 1726:2019.

2. Faktor keutamaan gempa

Faktor keutamaan gempa (I_e) merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan struktur tahan gempa yang digunakan untuk memperhitungkan tingkat kepentingan suatu bangunan. Nilai faktor ini ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan dan berpengaruh terhadap besarnya gaya gempa rencana yang harus ditahan oleh struktur. Penentuan nilai faktor keutamaan gempa (I_e) mengacu pada ketentuan standar yang berlaku. Nilai faktor keutamaan gempa (I_e) yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4. 11 Faktor Keutamaan Gempa

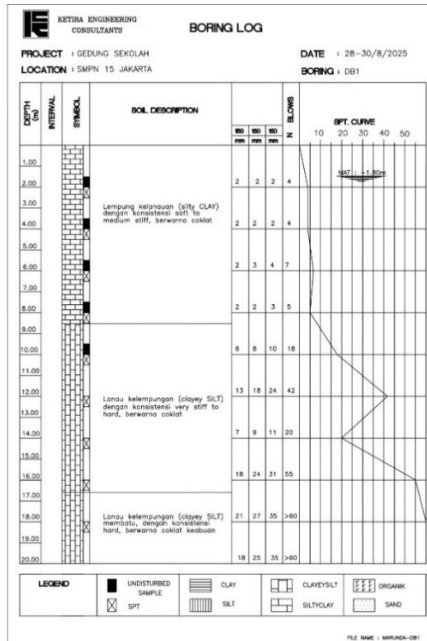
| Kategori Risiko | Faktor keutamaan gempa, I_e |
|-----------------|-------------------------------|
| I atau II | 1,0 |
| III | 1,25 |
| IV | 1,5 |

(Sumber: SNI 1726:2019)

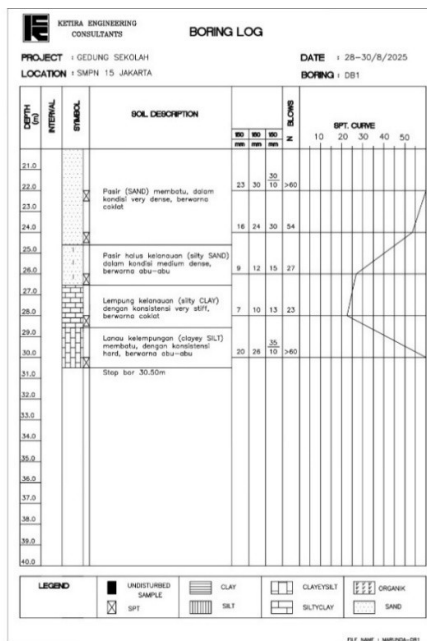
Faktor keutamaan gempa (I_e) ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan sesuai SNI 1726:2019. Untuk bangunan dengan kategori risiko IV, seperti gedung sekolah, digunakan nilai I_e sebesar 1,5 guna meningkatkan tingkat keamanan terhadap beban gempa.

3. Klasifikasi situs berdasarkan hasil pengujian SPT

Klasifikasi situs merupakan salah satu tahapan penting dalam perencanaan struktur tahan gempa yang bertujuan untuk menentukan karakteristik tanah dasar berdasarkan hasil penyelidikan tanah. Penentuan klasifikasi situs dilakukan dengan mengacu pada data hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT) yang diperoleh dari *boring log*. Nilai hasil pengujian SPT digunakan untuk mengevaluasi kondisi tanah pada setiap lapisan, sehingga dapat ditentukan kategori situs yang sesuai berdasarkan ketentuan standar yang berlaku. Data hasil pengujian SPT yang digunakan dalam analisis ini disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4. 2 Hasil Boring Log



Gambar 4. 3 Hasil Boring Log

Tabel 4. 12 Hasil N-SPT SMK Negeri 15 Jakarta

| No | Jarak | Kedalaman (di) | BH-01 | di/BH-1 |
|-------------|-------|----------------|-------|---------|
| 1 | 2 | 2 | 4 | 0,500 |
| 2 | 4 | 2 | 4 | 0,500 |
| 3 | 6,0 | 2 | 7 | 0,286 |
| 4 | 8,0 | 2 | 5 | 0,400 |
| 5 | 10,0 | 2 | 16,5 | 0,121 |
| 6 | 12,0 | 2 | 28,5 | 0,070 |
| 7 | 14,0 | 2 | 17,5 | 0,114 |
| 8 | 16,0 | 2 | 35 | 0,057 |
| 9 | 18,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 10 | 20,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 11 | 22,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 12 | 24,0 | 2 | 34,5 | 0,058 |
| 13 | 26,0 | 2 | 21 | 0,095 |
| 14 | 28,0 | 2 | 19 | 0,105 |
| 15 | 30,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| | | 30 | | 2,520 |
| N rata-rata | | | | 11,903 |

$$\begin{aligned} di/BH - 1 &= \frac{2}{4} \\ di/BH - 1 &= 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N rata-rata} &= \frac{di}{di/BH - 1} \\ &= \frac{30}{2,52} \\ &= 11,903 \end{aligned}$$

Tabel 4. 13 Kelas Situs

| Kelas Situs | Vs (m/detik) | N atau Nch | Su (kPa) |
|---|--------------|------------|----------|
| SA (Batuan Keras) | >1500 | N/A | N/A |
| SB (Batuan) | 750-1500 | N/A | N/A |
| SD (Tanah Sedang) | 175-350 | 15-50 | 50-100 |
| SE (Tanah Lunak) | <175 | <15 | <50 |
| Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : | | | |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niral su < 25 kPa | | | |

| Kelas Situs | Vs (m/detik) | N atau Nch | Su (kPa) |
|---|---|------------|----------|
| SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs) | Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: | | |

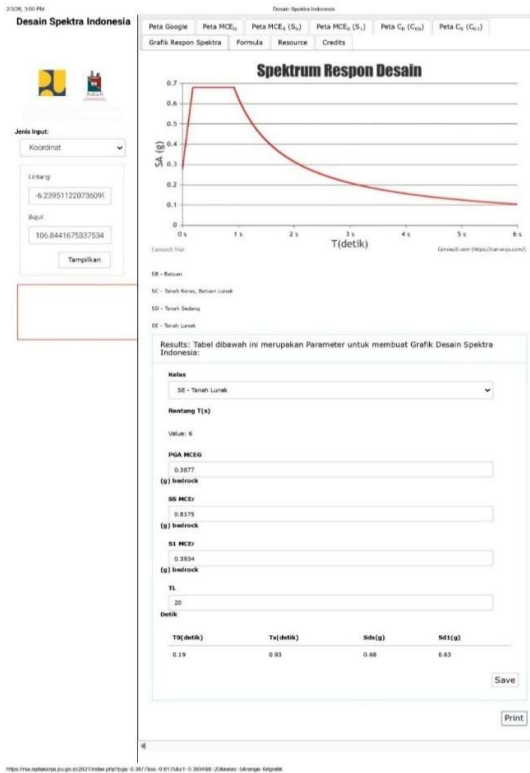
- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah.
- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3\text{m}$).
- Lempung berplastis sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5\text{ m}$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$).
- Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35\text{ m}$ dengan $su < 50\text{kPa}$.

(Sumber: SNI 1726:2019)

Berdasarkan hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT), diperoleh nilai rata-rata N sebesar 11,903. Mengacu pada ketentuan dalam SNI 1726:2019 Pasal 5.3, nilai tersebut termasuk dalam klasifikasi situs tanah SE (tanah lunak). Dengan demikian, kondisi tanah pada lokasi perencanaan dikategorikan sebagai tanah sedang yang akan digunakan sebagai dasar dalam penentuan parameter respon spektrum gempa.

4. Parameter respons spektrum percepatan gempa maksimum

Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (*MCER*) ditetapkan berdasarkan nilai percepatan spektral periode pendek (S_s) dan periode 1 detik (S_1) yang diperoleh dari peta spektra desain melalui website Desain Spektra Indonesia. Penentuan parameter tersebut dilakukan berdasarkan koordinat lokasi perencanaan yang berada di wilayah Kecamatan Pancoran, Jakarta Selatan, yaitu pada lintang -6,23951122073609 dan bujur 106,8441675337534, sehingga nilai yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi seismik di lokasi bangunan secara akurat. Nilai parameter respons spektral yang dihasilkan selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan spektrum respons desain gempa.



Gambar 4. 4 Hasil Spektrum Respon Desain SMP Negeri 15 Jakarta

(Sumber: Desain Spektra Indonesia)

5. Spektrum respons desain

a. Koefisien situs F_a

Koefisien situs (F_a) merupakan parameter yang digunakan dalam penentuan spektrum respons desain gempa untuk memperhitungkan pengaruh kondisi tanah terhadap percepatan gempa pada periode pendek. Nilai (F_a) ditentukan berdasarkan klasifikasi situs serta nilai percepatan spektral gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ($MCER$) pada periode pendek (S_s) dengan periode 0,2 detik. Penentuan nilai koefisien situs (F_a) mengacu pada ketentuan standar yang berlaku dan disajikan dalam bentuk tabel sesuai dengan variasi nilai (S_s) dan kelas situs. Nilai koefisien situs (F_a) yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4. 14 Tabel Koefisien Situs, Fa

| Kelas Situs | Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, T = 0,2 detik (Ss) | | | | | |
|-------------|--|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | Ss ≤ 0,25 | Ss = 0,5 | Ss = 0,75 | Ss = 1,0 | Ss = 1,25 | Ss ≥ 1,5 |
| SA | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SB | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| SC | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| SD | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| SE | 2,4 | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 0,8 |
| SF | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) |

(Sumber: SNI 1726:2019)

Nilai Ss hasil tabel

$$Ss1 = 0,75 \text{ g}$$

$$Ss2 = 1 \text{ g}$$

$$\text{Nilai Ss (MCER)} = 0,8175 \text{ g}$$

Nilai kelas situs

$$Fa1 = 1,3 \text{ g}$$

$$Fa2 = 1,1 \text{ g}$$

$$\text{Nilai Fa (MCER)} =$$

$$Fa = Fa1 + \frac{(Ss - Ss1)}{(Ss2 - Ss1)} \times (Fa2 - Fa1)$$

$$Fa = 1,3 + \frac{(0,8175 - 0,75)}{(1 - 0,75)} \times (1,1 - 1,3)$$

$$Fa = 1,246 \text{ g}$$

b. Koefisien situs Fv

Koefisien situs (F_v) merupakan parameter yang digunakan dalam penentuan spektrum respons desain gempa untuk memperhitungkan pengaruh kondisi tanah terhadap percepatan gempa pada periode panjang. Nilai (F_v) ditentukan berdasarkan klasifikasi situs serta nilai percepatan spektral gempa maksimum

yang dipertimbangkan risiko tertarget (*MCER*) pada periode 1 detik (S_1). Penentuan koefisien situs (F_v) mengacu pada ketentuan standar yang berlaku dan disajikan dalam bentuk tabel yang memuat variasi nilai (S_1) untuk masing-masing kelas situs. Nilai koefisien situs (F_v) yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4. 15 Tabel Koevisien Situs, F_v

| Kelas Situs | Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (<i>MCER</i>) terpetakan pada periode 1 detik (S_1) | | | | | |
|-------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $S_1 \leq 0,1$ | $S_1 \leq 0,2$ | $S_1 \leq 0,3$ | $S_1 \leq 0,4$ | $S_1 \leq 0,5$ | $S_1 \leq 0,6$ |
| SA | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SB | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SC | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,4 |
| SD | 2,4 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,7 |
| SE | 4,2 | 3,3 | 2,8 | 2,4 | 2,2 | 2,0 |
| SF | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) |

(Sumber: SNI 1726:2019)

Nilai S_s hasil tabel

$$S_{11} = 0,3 \text{ g}$$

$$S_{12} = 0,4 \text{ g}$$

$$\text{Nilai } S_1 \text{ (MCER)} = 0,393 \text{ g}$$

Nilai kelas situs

$$F_{v1} = 2,8 \text{ g}$$

$$F_{v2} = 2,4 \text{ g}$$

Nilai F_v (MCER) =

$$F_v = F_{v1} + \frac{(S_s - S_s)}{(S_{s2} - S_s)} \times (F_{v2} - F_{v1})$$

$$F_v = 2,8 + \frac{(0,393 - 0,3)}{(0,4 - 0,3)} \times (2,4 - 2,8)$$

$$F_v = 2,426 \text{ g}$$

Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (SMS) dan periode 1 detik (SM1) merupakan parameter yang menggambarkan respons maksimum struktur terhadap beban gempa pada masing-masing periode getar.

$$\begin{aligned}
 \text{a) Nilai } S_{MS} &= F_a \times S_S \\
 &= 1,246 \times 0,8175 \\
 &= 1,019 \text{ g} \\
 \text{b) Nilai } S_{M1} &= F_v \times S_1 \\
 &= 2,426 \times 0,393 \\
 &= 0,955 \text{ g}
 \end{aligned}$$

6. Kategori desain seismik

Parameter percepatan spektral desain pada periode pendek (SDS) dan periode 1 detik (SD1) merupakan parameter yang digunakan dalam analisis dan perencanaan respons struktur terhadap pengaruh gempa.

$$\begin{aligned}
 \text{a) Nilai } S_{DS} & \\
 S_{DS} &= \frac{2}{3} \times S_{MS} \\
 S_{DS} &= \frac{2}{3} \times 1,019 \\
 &= 0,679 \text{ g} \\
 \text{b) Nilai } S_{D1} & \\
 S_{D1} &= \frac{2}{3} \times S_{M1} \\
 S_{D1} &= \frac{2}{3} \times 0,955 \\
 &= 0,636 \text{ g} \\
 \text{c) } T_0 &= 0,2 \times \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\
 &= 0,2 \times \frac{0,636}{0,679} \\
 &= 0,187 \text{ detik} \\
 \text{d) } T_S &= \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\
 &= \frac{0,636}{0,679} \\
 &= 0,937 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

e) $T_l = 20$ detik

Tabel 4. 16 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

| Nilai S_{DS} | Kategori Risiko | |
|-------------------------------|--------------------|----------|
| | I atau II atau III | IV |
| $S_{DS} < 0,167$ | A | A |
| $0,167 \leq S_{DS} \leq 0,33$ | B | C |
| $0,33 \leq S_{DS} \leq 0,50$ | C | D |
| $0,50 \leq S_{DS}$ | D | D |

(Sumber SNI 1726-2019)

Tabel 4. 17 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

| Nilai S_{D1} | Kategori Risiko | |
|--------------------------------|--------------------|----------|
| | I atau II atau III | IV |
| $S_{D1} < 0,067$ | A | A |
| $0,167 \leq S_{D1} \leq 0,133$ | B | C |
| $0,33 \leq S_{D1} \leq 0,20$ | C | D |
| $0,20 \leq S_{D1}$ | D | D |

(Sumber SNI 1726-2019)

Penentuan Kategori Desain Seismik (KDS) dilakukan berdasarkan parameter percepatan spektral desain, yaitu S_{DS} dan S_{D1} , serta kategori risiko bangunan sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.5. Untuk bangunan dengan kategori risiko IV, KDS ditentukan berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} , dimana untuk $S_{DS} \geq 0,50$ dan $S_{D1} \geq 0,20$ maka bangunan diklasifikasikan ke dalam Kategori Desain Seismik D. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai $S_{DS} = 0,679$ dan $S_{D1} = 0,636$, sehingga memenuhi ketentuan tersebut.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.5 dan hasil evaluasi terhadap parameter desain seismik serta kategori risiko bangunan IV, Gedung SMPN 15 Jakarta Selatan diklasifikasikan ke dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D.

7. Nilai koefisien faktor R, Ω, C_d

Nilai koefisien faktor modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0), serta faktor pembesaran defleksi (C_d) merupakan parameter penting dalam perencanaan struktur tahan gempa yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku inelastik sistem struktur. Nilai-nilai tersebut ditentukan berdasarkan jenis sistem pemikul gaya seismik yang digunakan, sehingga mencerminkan kemampuan struktur dalam menyerap dan mendistribusikan energi gempa. Penentuan koefisien ini mengacu pada ketentuan standar yang berlaku dan digunakan dalam analisis gaya gempa serta evaluasi kinerja struktur. Nilai koefisien (R), (Ω_0), dan (C_d) yang digunakan dalam perencanaan ini disajikan pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4. 18 Faktor Koefisien Modifikasi Respons, Faktor Kuat Lebih Sistem, Faktor Pembesaran Defleksi, dan Batasan Tinggi Sistem Struktur

| Sistem Pemikul Gaya Seismik | Koefisien Modifikasi Respons R^a | Faktor Kuat Lebih Sistem Ω_0^b | Faktor Pembesaran Defleksi C_d^c | Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|----|-------|-------|-------|
| | | | | Kategori Desain Seismik | | | | |
| | | | | B | C | D^e | E^e | F^f |
| Rangka beton bertulang pemikul momen khusus | 8 | 3 | 5½ | TB | TB | TB | TB | TB |

(Sumber SNI 1726-2019)

Sistem pemikul gaya seismik yang digunakan pada Gedung SMPN 15 Jakarta Selatan adalah Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2, nilai parameter desain untuk sistem tersebut ditentukan sebagai berikut.

- Nilai koefisien modifikasi respon (R) adalah 8
- Nilai faktor kuat lebih sistem (Ω) adalah 3
- Nilai faktor pembesaran defleksi (C_d) adalah 5,5

8. Periode getaran fundamental gempa

Periode getaran fundamental struktur merupakan salah satu parameter penting dalam analisis gempa, yang digunakan untuk menentukan respons

struktur terhadap beban seismik. Nilai periode ini dipengaruhi oleh karakteristik struktur, seperti tinggi bangunan dan sistem struktur yang digunakan. Dalam perencanaan ini, penentuan parameter yang berkaitan dengan periode getaran mengacu pada SNI 1726:2019, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.19** berikut:

Tabel 4. 19 Parameter Percepatan Respons Spektral Desain Pada 1 Detik, SD1

| Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 detik, SD1 | Koefisien C_u |
|--|-----------------|
| $\geq 0,4$ | 1,4 |
| 0,3 | 1,4 |
| 0,2 | 1,5 |
| 0,15 | 1,6 |
| $\leq 0,1$ | 1,7 |

(Sumber SNI 1726-2019)

Tabel 4. 20 Tipe Struktur Pada Sistem Rangka Pemikul Momen

| Tipe Struktur | C_t | α |
|--|--------|----------|
| Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik: | | |
| a) Rangka baja pemikul momen | 0,0724 | 0,8 |
| b) Rangka beton pemikul momen | 0,0466 | 0,9 |
| Rangka baja dengan bresing eksentris | 0,0731 | 0,75 |
| Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk | 0,0731 | 0,75 |
| Semua sistem struktur lainnya | 0,0488 | 0,75 |

(Sumber SNI 1726-2019)

Nilai periode fundamental pendekatan (T_a) ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

- 1) Periode Minimum (T_a min)

$$\begin{aligned} T_a \text{ min} &= C_t \times H n^x \\ &= 0,0466 \times 22,95^{0,9} \\ &= 0,782 \text{ detik} \end{aligned}$$

- 2) Periode Maksimum (T_a max)

$$T_a \text{ max} = C_u \times T_a \text{ min}$$

$$= 1,4 \times 0,782$$

$$= 1,095 \text{ detik}$$

3) Periode hasil *ETABS* (TC)

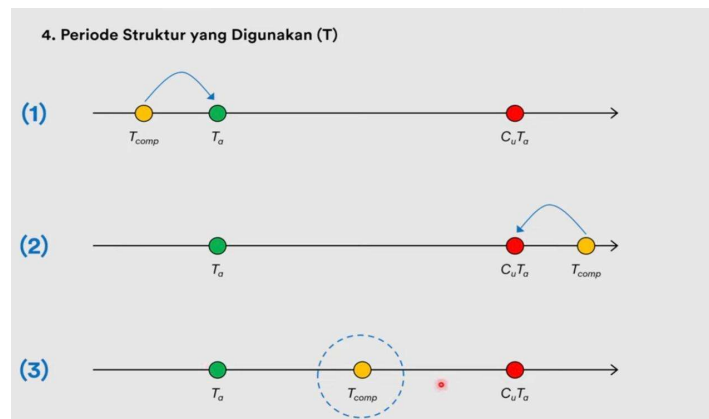
$$\text{TC arah x} = 0,784$$

$$\text{TC arah y} = 0,656$$

$$\text{Cek Kontrol} = T_a \text{ min} < \text{TC} < T_a \text{ max}$$

$$\text{Arah x} = 0,782 < 0,784 < 1,095$$

$$\text{Arah y} = 0,655 < 0,782 < 1,095$$



Gambar 4. 5 Periode Struktur Yang Digunakan

(Sumber SNI 1726-2019)

Maka nilai T_a diambil =

$$\text{Arah x} = 0,784$$

$$\text{Arah y} = 0,782$$

4.4 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan dalam perencanaan struktur mengacu pada ketentuan SNI 1727:2020 mengenai beban desain minimum. Adapun kombinasi pembebanan untuk desain kekuatan dengan mempertimbangkan faktor kuat lebih ditentukan sebagai berikut:

1. Kombinasi Dasar (SNI 1727:2020) Pasal 2.3.1

a. $1.4 DL$

b. $1.2 DL + 1.6LL + 0,5(LR \text{ atau } R)$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a) $1.2 DL + 1.6 LL + 0,5 R$

c. $1.2 DL + 1.6 (Lr \text{ atau } R) + (LL \text{ atau } 0.5 W)$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a) $1.2 DL + 1.6 R + LL$

b) $1.2 DL + 1.6 R + 0.5 W$

c) $1.2 DL + 1.6 R - 0.5 W$

d. $1.2 DL + 1.0 W + L + 0.5 (Lr \text{ atau } R)$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a) $1.2 DL + 1.0 W + L + 0.5 R$

b) $1.2 DL - 1.0 W + L + 0.5 R$

e. $0.9 DL + 1.0 W$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a) $0.9 DL + 1.0 W$

b) $0.9 DL - 1.0 W$

2. Kombinasi Akibat Gempa (SNI 1726:2019) Pasal 4.2.2.3

a. $1.2 DL + E_v + E_h + LL$

$$1.2 DL + 0.2 S_{DS} D + E_x + E_y + L$$

$$(1.2 DL + 0.2 S_{DS}) D + E_x + E_y + L$$

$$(1.2 DL + 0.2 \times 0,679) D + E_x + E_y + L$$

$$1.34 DL + E_x + E_y + L$$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a) $1.34D + E_{x+}TT + 0.3E_y + L$

b) $1.34D - E_{x+}TT + 0.3E_y + L$

c) $1.34D + E_{x-}TT - 0.3E_y + L$

d) $1.34D - E_{x-}TT - 0.3E_y + L$

e) $1.34D + E_{x-}TT + 0.3E_y + L$

f) $1.34D - E_{x-}TT + 0.3E_y + L$

g) $1.34D + E_{x-}TT - 0.3E_y + L$

- h) $1.34D - E_{x-}TT - 0.3E_{\gamma} + L$
- i) $1.34D + E_{\gamma+}TT + 0.3E_x + L$
- j) $1.34D - E_{\gamma+}TT + 0.3E_x + L$
- k) $1.34D + E_{\gamma+}TT - 0.3E_x + L$
- l) $1.34D - E_{\gamma+}TT - 0.3E_x + L$
- m) $1.34D + E_{\gamma-}TT + 0.3E_x + L$
- n) $1.34D - E_{\gamma-}TT + 0.3E_x + L$
- o) $1.34D + E_{\gamma-}TT - 0.3E_x + L$
- p) $1.34D - E_{\gamma-}TT - 0.3E_x + L$

b. $0.9 DL - E_v + E_h$

$$0.9 DL - 0.2 S_{DS}DL + E_x + E_{\gamma}$$

$$(0.9 - 0.2 S_{DS}) DL + E_x + E_{\gamma}$$

$$(0.9 - 0.2 \times 0,679) DL + E_x + E_{\gamma}$$

$$0.76 DL + E_x + E_{\gamma}$$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

- a) $0.76D + E_{x+}TT + 0.3E_{\gamma}$
- b) $0.76D - E_{x+}TT + 0.3E_{\gamma}$
- c) $0.76D + E_{x+}TT - 0.3E_{\gamma}$
- d) $0.76D - E_{x+}TT - 0.3E_{\gamma}$
- e) $0.76D + E_{x-}TT + 0.3E_{\gamma}$
- f) $0.76D - E_{x-}TT + 0.3E_{\gamma}$
- g) $0.76D + E_{x-}TT - 0.3E_{\gamma}$
- h) $0.76D - E_{x-}TT - 0.3E_{\gamma}$
- i) $0.76D + E_{\gamma+}TT + 0.3E_x$
- j) $0.76D - E_{\gamma+}TT + 0.3E_x$
- k) $0.76D + E_{\gamma+}TT - 0.3E_x$
- l) $0.76D - E_{\gamma+}TT - 0.3E_x$
- m) $0.76D + E_{\gamma-}TT + 0.3E_x$
- n) $0.76D - E_{\gamma-}TT + 0.3E_x$

- o) $0.76D + E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$
 p) $0.76D - E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$

4.5 Analisa Struktur

Analisis struktur bertujuan untuk menjamin kestabilan dan keselamatan bangunan melalui pengendalian terhadap kinerja setiap elemen struktur. Pada penelitian ini, analisis struktur Gedung SMPN 15 Jakarta Selatan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ETABS*. Tahapan analisis struktur tersebut meliputi langkah-langkah sebagai berikut.

Berdasarkan hasil analisis struktur menggunakan perangkat lunak *ETABS*, terdapat beberapa parameter yang perlu dilakukan pengecekan kontrol. Adapun pemeriksaan tersebut meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Ketidakberaturan Struktur

Pemeriksaan ketidakberaturan struktur dilakukan untuk mengidentifikasi penyimpangan konfigurasi bangunan secara horizontal dan vertikal yang mempengaruhi respons terhadap gempa, sesuai SNI 1726:2019. Struktur yang memenuhi kriteria regular memiliki distribusi gaya dan deformasi yang lebih merata.

a. Ketidakberaturan Horizontal

Tabel 4. 21 Hasil Ketidakberaturan Torsi

| Lantai | Arah X | | | | Arah Y | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|---------|
| | Δ_{max} (X) | Δ_{avg} (X) | $\Delta_{max}/\Delta_{avg}$ (X) | CEK X | Δ_{max} (Y) | Δ_{avg} (Y) | $\Delta_{max}/\Delta_{avg}$ (Y) | CEK Y |
| ATAP | 4,787 | 4,368 | 1,041 | Regular | 5,489 | 5,243 | 1,159 | Regular |
| DAK | 7,415 | 7,138 | 1,036 | Regular | 9,073 | 7,856 | 1,248 | Regular |
| 5 | 10,40 1 | 10,25 7 | 1,033 | Regular | 13,88 5 | 10,95 9 | 1,442 | Tidak |
| 4 | 13,19 1 | 13,16 8 | 1,018 | Regular | 17,31 8 | 13,56 2 | 1,224 | Tidak |
| 3 | 13,94 1 | 13,75 7 | 1,022 | Regular | 17,86 3 | 14,13 5 | 1,257 | Tidak |
| 2 | 9,069 | 9,020 | 1,059 | Regular | 10,85 9 | 8,887 | 1,295 | Tidak |
| 1 | 0,041 | 0,020 | 1,110 | Tidak | 0,005 | 0,003 | 1,167 | Tidak |

Tabel 4. 22 Hasil Ketidakberaturan Sudut Dalam

| Parameter | Nilai | Satuan |
|-----------|-------|--------|
| Lx | 44,5 | m |
| Px | 4 | m |
| Ly | 20,5 | m |
| Py | 8 | m |
| Px/Lx | 9% | - |
| Py/Ly | 39% | - |
| Cek | II.2 | - |

Tabel 4. 23 Hasil Ketidakberaturan Diafragma

| Parameter | Nilai | Satuan |
|-----------|---------|----------------|
| A total | 665,9 | m ² |
| A bukaan | 75,5 | m ² |
| Cek | Regular | - |

b) Ketidakberaturan Vertikal

Tabel 4. 24 Hasil Ketidakberaturan Massa Struktur

| Lantai | Massa (kg) | Cek |
|--------|------------|---------|
| ATAP | 11356,97 | Reguler |
| DAK | 574066,57 | Reguler |
| 5 | 872316,51 | Reguler |
| 4 | 994318,34 | Reguler |
| 3 | 976381,07 | Reguler |
| 2 | 1028997,11 | Reguler |
| 1 | 809896,17 | Reguler |

Tabel 4. 25 Hasil Ketidakberaturan Geometri Vertikal

| Lantai | L (mm) | Cek |
|--------|--------|---------|
| ATAP | 650 | Reguler |
| DAK | 650 | Reguler |
| 5 | 650 | Reguler |
| 4 | 650 | Reguler |
| 3 | 650 | Reguler |
| 2 | 650 | Reguler |
| 1 | 650 | Reguler |

Tabel 4. 26 Hasil Ketidakberaturan Kekauan Lantai

| Lantai | Kekakuan X (kN/m) | Cek X | Kekakuan Y (kN/m) | Cek Y |
|--------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| ATAP | 31,322 | - | 29,7374 | - |
| DAK | 1358,993 | Reguler | 1283,423 | Reguler |
| 5 | 2882,051 | Reguler | 2709,243 | Reguler |
| 4 | 4090,343 | Reguler | 3827,872 | Reguler |
| 3 | 4802,258 | Reguler | 4476,7 | Reguler |
| 2 | 157,066 | V.5b | -68,908 | V.5b |

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan struktur secara keseluruhan, bangunan termasuk dalam kategori memiliki ketidakberaturan yang signifikan baik secara horizontal maupun vertikal. Dengan kondisi tersebut, serta mempertimbangkan bahwa bangunan termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D, maka pemilihan metode analisis struktur mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019 Tabel 16 mengenai prosedur analisis yang diizinkan.

Berdasarkan ketentuan tersebut, struktur tanpa ketidakberaturan dengan ketinggian yang memenuhi syarat dapat dianalisis menggunakan metode spektrum respons ragam (MRSA). Oleh karena itu, metode MRSA digunakan untuk memperoleh respons gempa yang lebih akurat.

2. Analisa Spektrum Respons Ragam (Jumlah Ragam)

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1, partisipasi massa ragam harus $\geq 90\%$. Hasil analisis ETABS pada Gedung SMPN 15 Jakarta Selatan telah memenuhi ketentuan tersebut, dengan hasil sebagai berikut.

| Case | Mode | Period sec | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY |
|-------|------|------------|--------|--------|----|--------|--------|
| Modal | 1 | 1,11 | 0,0211 | 0,6558 | 0 | 0,0211 | 0,6558 |
| Modal | 2 | 1,02 | 0,7836 | 0,0144 | 0 | 0,8046 | 0,6702 |
| Modal | 3 | 0,857 | 0,0012 | 0,1314 | 0 | 0,8058 | 0,8016 |
| Modal | 4 | 0,343 | 0,0048 | 0,1012 | 0 | 0,8106 | 0,9028 |
| Modal | 5 | 0,325 | 0,1095 | 0,0052 | 0 | 0,9202 | 0,9079 |

Gambar 4. 6 Hasil Analisis Jumlah Ragam

Berdasarkan hasil analisis, nilai partisipasi massa pada arah X sebesar 92,02% dan pada arah Y sebesar 90,79%, dengan jumlah mode getar sebanyak 5 mode, sehingga telah memenuhi persyaratan minimum yang ditetapkan.

3. Pesekalaan Gaya

Pada analisis MRSA, dilakukan penskalaan gaya untuk menyesuaikan gaya geser dasar dinamik terhadap statik ekuivalen sesuai SNI 1726:2019, guna memastikan gaya gempa tidak kurang dari batas minimum yang disyaratkan.

- a. Gaya geser statis $V_x = 11292,2825 \text{ kN}$
 $V_y = 11074,6342 \text{ kN}$
- b. Faktor skala awal $SF = \frac{g}{R/I}$
 $= \frac{9,80665}{8/1,5}$
 $= 1,839 \text{ m/s}^2$
 $= 1838,747 \text{ mm/s}^2$
- c. Gaya geser dinamis $V_{LX} = 8983,772 \text{ kN}$
 $V_{LY} = 7820,3786 \text{ kN}$
- d. Perbandingan gaya geser dasar statis dan dinamis

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4.1, gaya geser dasar hasil analisis respons ragam (V_t) harus \geq gaya geser dasar metode statik ekuivalen (V). Jika $V_t < V$, maka hasil analisis perlu diskalakan dengan faktor V/V_t . Pada Gedung SMPN 15 Jakarta Selatan, diperoleh hasil perbandingan sebagai berikut.

Tabel 4. 27 Perbandingan Gaya Geser Dasar Statis dan Dinamis

| Base Shear | Dinamis (V_L) | Statis (V) | Kontrol |
|------------|-------------------|------------------|-----------------|
| | Geser Dasar (kN) | Geser Dasar (kN) | $V_L > 100\% V$ |
| Arah x | 11292,282 | 8983,772 | OK |
| Arah y | 11074,634 | 7820,378 | OK |

$$\begin{aligned}
 \text{e. Penskalaan gaya gempa } F_x &= \max\left(1, \frac{v_x}{v_{LX}}\right) \\
 &= \max(1, 1,257) \\
 &= 1,257 \\
 F_y &= \max\left(1, \frac{v_y}{v_{LY}}\right) \\
 &= \max(1, 1,416) \\
 &= 1,416 \\
 \text{f. Faktor skala untuk gaya } S_{FX} &= SF \times F_x \\
 &= 1838,747 \times 1,257 \\
 &= 2311,23955 \text{ mm/s}^2 \\
 S_{FY} &= SF \times F_y \\
 &= 1838,747 \times 1,416 \\
 &= 2603,89555 \text{ mm/s}^2
 \end{aligned}$$

4. Penskalaan Simpangan

Dalam evaluasi simpangan antar tingkat, nilai simpangan diambil langsung dari hasil analisis respons spektrum tanpa penskalaan, untuk merepresentasikan deformasi aktual, dengan tetap mempertimbangkan faktor amplifikasi defleksi sesuai SNI 1726:2019.

$$\begin{aligned}
 \text{a. Faktor skala awal } SF &= \frac{g}{R/I} \\
 &= \frac{9,80665}{8/1,5} \\
 &= 1,839 \text{ m/s}^2 \\
 &= 1838,747 \text{ mm/s}^2
 \end{aligned}$$

5. Simpangan Antar Tingkat

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, nilai simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi batas simpangan yang diizinkan.

Tabel 4. 28 Simpangan Antar Tingkat

| Struktur | Kategori risiko I atau II | Kategori risiko III | Kategori risiko IV |
|---|---------------------------|----------------------|----------------------|
| Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit- | 0,025h _{sx} | 0,020h _{sx} | 0,015h _{sx} |

| Struktur | Kategori risiko I atau II | Kategori risiko III | Kategori risiko IV |
|---|---------------------------|----------------------|----------------------|
| langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat | | | |
| Struktur dinding geser kantilever batu bata ^d | 0,010h _{sx} | 0,010h _{sx} | 0,010h _{sx} |
| Struktur dinding geser batu bata lainnya | 0,007h _{sx} | 0,007h _{sx} | 0,007h _{sx} |
| Semua struktur lainnya | 0,020h _{sx} | 0,015h _{sx} | 0,010h _{sx} |

(Sumber SNI 1726-2019)

Hasil simpangan antar lantai pada arah X dan arah Y yang diperoleh dari analisis menggunakan ETABS dapat dilihat pada **Tabel 4.29** Hasil Simpangan Antar Tingkat.

6. Pengaruh P Delta

Berdasarkan SNI 1726:2019, pengaruh P-Delta perlu diperhitungkan untuk memastikan kestabilan struktur akibat kombinasi beban aksial dan simpangan lateral. Struktur dinyatakan aman apabila efek P-Delta tidak melebihi batas yang diizinkan, dapat dilihat pada **Tabel 4.30** Hasil Pengaruh P Delta.

Tabel 4. 29 Hasil Simpangan Antar Tingkat

| Story | Displacement | | Elastic Drift | | h | Inelastic Drift | | Drift Limit | Cek |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|-----------------|------------|-------------|-----|
| | δ_{ex} | δ_{ey} | δ_{ex} | δ_{ey} | | Δx | Δy | | |
| | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | | (mm) | (mm) | | |
| 6 | 33,68 | 14,50 | 6,96 | 3,79 | 4000 | 25,53 | 13,90 | 30,769 | OK |
| 5 | 26,72 | 10,71 | 8,03 | 3,22 | 4000 | 29,43 | 11,80 | 30,769 | OK |
| 4 | 18,70 | 7,5 | 7,77 | 2,89 | 4000 | 28,49 | 10,58 | 30,769 | OK |
| 3 | 10,93 | 4,61 | 6,48 | 2,50 | 4000 | 23,76 | 9,16 | 30,769 | OK |
| 2 | 4,44 | 2,11 | 4,11 | 1,94 | 4000 | 15,09 | 7,12 | 30,769 | OK |
| 1 | 0,33 | 0,16 | 0,33 | 0,16 | 1200 | 1,21 | 0,60 | 9,231 | OK |

Berdasarkan **Tabel 4.29**, hasil analisis simpangan antar tingkat (*story drift*) menunjukkan bahwa nilai perpindahan struktur, baik pada arah X maupun Y, relatif kecil dan masih berada dalam batas yang diizinkan. Nilai *elastic drift* yang diperoleh kemudian dikalikan dengan faktor modifikasi untuk menghasilkan *inelastic drift* (Δx dan Δy), yang merepresentasikan kondisi struktur saat mengalami respons gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa simpangan terbesar terjadi pada lantai atas, yaitu lantai 6, dengan nilai *inelastic drift* maksimum sebesar 25,53 mm

pada arah X dan 13,90 mm pada arah Y. Sementara itu, pada rantai lainnya nilai simpangan cenderung lebih kecil dan menurun ke arah rantai bawah. Meskipun demikian, seluruh nilai simpangan tersebut masih lebih kecil dibandingkan dengan batas simpangan yang diizinkan (*drift limit*), yaitu berkisar antara 9,231 mm hingga 30,769 mm, tergantung pada tinggi rantai. Dengan demikian, seluruh rantai dinyatakan memenuhi kriteria batas simpangan antar tingkat dengan status “OK”.

Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai serta mampu mengendalikan deformasi akibat beban gempa sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Tabel 4. 30 Hasil Pengaruh P Delta

| Story | Inelestic Drift | | Story Forces | | | h | Koefisien Stabilitas | | Batas Pengaruh P-Delta | Batas Stabilitas Struktur, θ_{max} | Cek |
|-------|-----------------|------------|--------------|---------|---------|------|----------------------|------------|------------------------|---|-----|
| | Δx | ΔY | P | Vx | Vy | | θx | θY | | | |
| | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | | (mm) | (mm) | | | |
| 6 | 33,68 | 14,50 | 7521,13 | 1737,39 | 1616,96 | 3000 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,09091 | OK |
| 5 | 26,72 | 10,71 | 18894,08 | 3922,79 | 3715,48 | 4000 | 0,01 | 0,00 | 0,10 | 0,09091 | OK |
| 4 | 18,70 | 7,5 | 31632,76 | 5724,71 | 5515,63 | 4000 | 0,01 | 0,00 | 0,10 | 0,09091 | OK |
| 3 | 10,93 | 4,61 | 44589,52 | 6932,65 | 6789,32 | 4000 | 0,01 | 0,00 | 0,10 | 0,09091 | OK |
| 2 | 4,44 | 2,11 | 57746,03 | 7578,76 | 7531,28 | 4000 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,09091 | OK |
| 1 | 0,33 | 0,16 | 68897,82 | 7689,21 | 7689,21 | 4000 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,09091 | OK |

Berdasarkan **Tabel 4.30**, hasil evaluasi pengaruh P-Delta menunjukkan bahwa nilai simpangan inelastik (Δx dan Δy) pada setiap tingkat relatif kecil, dengan nilai maksimum terjadi pada lantai 6, yaitu sebesar 33,68 mm pada arah X dan 14,50 mm pada arah Y. Gaya dalam struktur yang meliputi gaya aksial (P) serta gaya geser arah X (Vx) dan Y (Vy) menunjukkan kecenderungan meningkat dari lantai atas ke lantai bawah, yang mencerminkan akumulasi beban dari lantai di atasnya. Sementara itu, hasil perhitungan koefisien stabilitas (θx dan θy) pada seluruh tingkat menunjukkan nilai sebesar 0,01 untuk arah X dan 0,00 untuk arah Y. Nilai tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan batas pengaruh P-Delta sebesar 0,10 maupun batas stabilitas struktur (θ_{max}) sebesar 0,09091. Oleh karena itu, seluruh tingkat dinyatakan memenuhi kriteria stabilitas dengan status “OK”. Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki tingkat kekakuan dan stabilitas yang memadai serta aman terhadap efek sekunder akibat pembebanan.

4.6 Perhitungan Struktur Atas

4.6.1 Penulangan Struktur Balok

Perencanaan balok pada studi ini didasarkan pada hasil analisis struktur menggunakan ETABS, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan manual penulangan balok.

1. Data Perencanaan

| | |
|---|-----------------------------------|
| Tipe Balok | = B1 |
| Panjang Balok, L | = 8000 mm |
| Lebar Balok, b | = 400 mm |
| Tinggi Balok, h | = 650 mm |
| Panjang Tumpuan | = 1300 mm |
| Diameter Tulangan <i>Longitudinal</i> , d_b | = 25 mm |
| Diameter Tulangan Pinggang, d_{bt} | = 13 mm |
| Diameter Tulangan Sengkang, d_s | = 10 mm |
| Selimut Beton, C_c | = 40 mm |
| Tinggi Efektif Balok, d | = $h - c_c - d_s - \frac{d_b}{2}$ |
| | = $650 - 40 - 10 - \frac{25}{2}$ |
| | = 587,5 mm |
| Kuat Tekan Beton, f_c' | = 25 MPa |
| Kuat Leleh Tul. <i>Longitudinal</i> , f_y | = 420 MPa |
| Kuat Leleh Tul. <i>Transversal</i> , f_{yv} | = 420 MPa |
| β_1 | = 0,85 |
| Panjang Kolom, c_1 | = 650 mm |
| Lebar Kolom, c_2 | = 650 mm |
| L_n | = $L - c_c$ |
| | = 8000 - 650 |
| | = 7350 mm |
| λ | = 1 |

2. Gaya Dalam

$$M_u \text{ Tumpuan (-)} = 532,6025 \text{ kNm}$$

$$M_u \text{ Tumpuan (+)} = 359,1305 \text{ kNm}$$

$$M_u \text{ Lapangan (-)} = 250,9155 \text{ kNm}$$

$$M_u \text{ Lapangan (-)} = 177,8052 \text{ kNm}$$

$$V_u \text{ Tumpuan} = 343,2415 \text{ kNm}$$

$$V_u \text{ Lapangan} = 201,4722 \text{ kNm}$$

$$T_u = 52,5625 \text{ kNm}$$

3. Syarat Gaya dan Geometri

$$\begin{aligned} \text{Syarat Tinggi Efektif} &= L_n > 4d \\ &= 7350 > 4(587,5) \\ &= 7350 > 2350 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat Lebar 1} &= b > \min(0,3h, 250 \text{ mm}) \\ &= 400 > \min(0,3(650), 250 \text{ mm}) \\ &= 400 > 195 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat Lebar 2} &= b \leq c_2 + 2 \times \min(c_2, 0,75c_1) \\ &= 400 \leq 650 + 2 \times \min(650; 0,75(650)) \\ &= 400 \leq 1650 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \end{aligned}$$

4. Penulangan Lentur

a. Tumpuan Negatif

$$\text{Jumlah Tulangan, } n = 6$$

$$d_b = 25 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak Bersih Antar Tulangan} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - n \times d_b}{n - 1} \\ &= \frac{400 - 2(40) - 2(10) - 6(25)}{5} \\ &= 30 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Jarak Bersih} &= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm} \\ &= 30 \geq 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah Lapis} = 1$$

$$\text{As Pasang} = n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 6 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \\
 &= 2945,243 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 1}} &= \frac{f_c'^{0,5}}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{25^{0,5}}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 699,405 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 2}} &= \frac{1,4}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 783,333 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } A_{S_{\min}} &= A_s \text{ Pasang} \geq \max(A_{S_{\min 1}}, A_{S_{\min 2}}) \\
 &= 2945,243 \geq 783,333 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 P &= \frac{A_s}{b \times d} \\
 &= \frac{2945,243}{400 \times 587,5} \\
 &= 1,25\% \\
 P_{\max 1} &= \frac{0,75 \times 0,85 \times \beta_1 \times f_c'}{f_y \times \left(\frac{600}{600 + f_y}\right)} \\
 &= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times 25}{176820} \\
 &= 1,90\% \\
 P_{\max 2} &= 2,5\% \\
 \text{Cek } A_{S_{\max}} &= \rho \leq \max(P_{\max 1}, P_{\max 2}) \\
 &= 1,25\% \leq 2,5\% \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 a &= A_s \times \frac{f_y}{(0,85 \times f_c' \times b)} \\
 &= 2945,243 \times \frac{420}{(0,85 \times 25 \times 400)} \\
 &= 145,530 \text{ mm} \\
 M_n &= A_s \times f_y \times (d - a/s) \\
 &= 2945,243 \times 420 \times \left(587,5 - \frac{145,530}{2}\right) / 10^6 \\
 &= 636,728 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{145,530}{0,85} \\
 &= 171,211 \text{ mm} \\
 \epsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{(587,5 - 171,211)}{171,211} \times 0,003 \\
 &= 0,007 \\
 \Phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{0,007 - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,900 \\
 \Phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 636,728 \\
 &= 573,056 \text{ kNm} \\
 M_u \text{ Tumpuan (-)} &= 532,603 \text{ kNm} \\
 \text{Cek Kapasitas} &= \phi M_n > M_u \\
 &= 573,056 > 532,603 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{As Perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - a/2)} \\
 &= \frac{532,603}{420 \times (514,735) / 10^6} \\
 &= 2463,599 \text{ mm}^2 \\
 \text{b. Tumpuan Positif} \\
 \text{Jumlah Tulangan, n} &= 5 \\
 d_b &= 25 \text{ mm} \\
 \text{Jarak Bersih Antar Tulangan} &= \frac{b - 2 C_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{400 - 2(40) - 2(10) - 6(25)}{4} \\
 &= 43,750 \text{ mm} \\
 \text{Cek Jarak Bersih} &= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm} \\
 &= 43,750 \geq 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{Jumlah Lapis} &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{As Pasang} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \\
 &= 2454,369 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 1}} &= \frac{f_c'^{0,5}}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{25^{0,5}}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 699,405 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 2}} &= \frac{1,4}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 783,333 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 4}} &= 0,5 \times A_{Stumpuan \text{ negatif}} \\
 &= 0,5 \times 2945,243 \\
 &= 1472,622 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } A_{S_{\min}} &= \text{As Pasang} \geq A_{S_{\min}} \\
 &= 2454,369 \geq 1472,6 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 P &= \frac{A_s}{b \times d} \\
 &= \frac{2454,369}{400 \times 587,5} \\
 &= 1,04\% \\
 P_{\max 1} &= \frac{0,75 \times 0,85 \times \beta_1 \times f_c'}{f_y \times (600/600 + f_y)} \\
 &= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times 25}{176820} \\
 &= 1,90\% \\
 P_{\max} &= 2,5\% \\
 \text{Cek } A_{S_{\max}} &= \rho \leq \rho_{\max} \\
 &= 1,04\% \leq 2,5\% \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 a &= A_s \times \frac{f_y}{(0,85 \times f_c' \times b)} \\
 &= 2454,369 \times \frac{420}{(0,85 \times 25 \times 400)} \\
 &= 121,275 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s \times f_y \times (d - a/s) \\
 &= 2454,369 \times 420 \times ((587,5 - \frac{121,275}{2})) / 10^6 \\
 &= 543,108 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{121,275}{0,85} \\
 &= 142,676 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{(587,5 - 142,676)}{142,676} \times 0,003 \\
 &= 0,009
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{0,007 - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 543,108 \\
 &= 488,798 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$M_u \text{ Tumpuan (+)} = 359,131 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Cek Kapasitas} &= \phi M_n > M_u \\
 &= 488,798 > 359,131 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{As Perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - a/s)} \\
 &= \frac{359,131}{420 \times (526,863) / 10^6} \\
 &= 1622,952 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

c. Lapangan Negatif

$$\text{Jumlah Tulangan, } n = 5$$

$$d_b = 25 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak Bersih Antar Tulangan} &= \frac{b - 2 C_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{400 - 2(40) - 2(10) - 6(25)}{4} \\
 &= 43,750 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

| | |
|------------------|--|
| Cek Jarak Bersih | = Jarak Bersih $\geq d_b$ dan 25 mm = 43,750 \geq 25 mm \rightarrow OK |
| Jumlah Lapis | = 1 |
| As Pasang | = $n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$ = $5 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2$ = 2454,369 mm^2 |
| $AS_{min 1}$ | = $\frac{f_c'^{0,5}}{4 \times f_y} \times b \times d$ = $\frac{25^{0,5}}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5$ = 699,406 mm^2 |
| $AS_{min 2}$ | = $\frac{1,4}{4 \times f_y} \times b \times d$ = $\frac{1,4}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5$ = 783,333 mm^2 |
| $AS_{min 4}$ | = 0,5 $\times AS_{tumpuan\ negatif}$ = 0,25 \times 2945,243 = 736,311 mm^2 |
| Cek AS_{min} | = As Pasang \geq As min = 2454,369 \geq 783,333 \rightarrow OK |
| P | = $\frac{As}{b \times d}$ = $\frac{2454,369}{400 \times 587,5}$ = 1,04% |
| $P_{max 1}$ | = $\frac{0,75 \times 0,85 \times \beta_1 \times f_c'}{f_y \times (600/600 + f_y)}$ = $\frac{0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times 25}{176820}$ = 1,90% |
| $P_{max 2}$ | = 2,5% |
| Cek AS_{max} | = $\rho \leq \rho_{max}$ = 1,04% \leq 2,5% \rightarrow OK |

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{f_y}{(0,85 \times f_c' \times b)} \\
 &= 2454,369 \times \frac{420}{(0,85 \times 25 \times 400)} \\
 &= 121,275 \text{ mm} \\
 M_n &= A_s \times f_y \times (d - a/s) \\
 &= 2454,369 \times 420 \times ((587,5 - \frac{121,275}{2})) / 10^6 \\
 &= 543,108 \text{ kNm} \\
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{121,275}{0,85} \\
 &= 142,676 \text{ mm} \\
 \epsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{(587,5 - 142,676)}{142,676} \times 0,003 \\
 &= 0,009 \\
 \Phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{0,007 - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,9 \\
 \Phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 543,108 \\
 &= 488,798 \text{ kNm} \\
 M_u \text{ Lapangan (-)} &= 250,916 \text{ kNm} \\
 \text{Cek Kapasitas} &= \phi M_n > M_u \\
 &= 488,798 > 250,916 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{As Perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - a/s)} \\
 &= \frac{250,916}{420 \times (526,863) / 10^6} \\
 &= 1133,916 \text{ mm}^2 \\
 \text{d. Lapangan Positif} & \\
 \text{Jumlah Tulangan, n} &= 5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_b &= 25 \text{ mm} \\
 \text{Jarak Bersih Antar Tulangan} &= \frac{b - 2 c_c - 2 d_s - n \times d_b}{n - 1} \\
 &= \frac{400 - 2(40) - 2(10) - 6(25)}{4} \\
 &= 43,750 \text{ mm} \\
 \text{Cek Jarak Bersih} &= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm} \\
 &= 43,750 \geq 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{Jumlah Lapis} &= 1 \\
 \text{As Pasang} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \\
 &= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2 \\
 &= 2454,369 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 1}} &= \frac{f_c'^{0,5}}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{25^{0,5}}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 699,405 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 2}} &= \frac{1,4}{4 \times f_y} \times b \times d \\
 &= \frac{1,4}{4 \times 420} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 783,333 \text{ mm}^2 \\
 A_{S_{\min 4}} &= 0,5 \times A_{S_{\text{tumpuan negatif}}} \\
 &= 0,25 \times 2945,243 \\
 &= 736,311 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } A_{S_{\min}} &= \text{As Pasang} \geq \text{As min} \\
 &= 2454,369 \geq 783,333 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 P &= \frac{A_s}{b \times d} \\
 &= \frac{2454,369}{400 \times 587,5} \\
 &= 1,04\% \\
 P_{\max 1} &= \frac{0,75 \times 0,85 \times \beta_1 \times f_c'}{f_y \times (600 / 600 + f_y)} \\
 &= \frac{0,75 \times 0,85 \times 0,85 \times 25}{176820}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,90\% \\
 P_{\max 2} &= 2,5\% \\
 \text{Cek } A_{s_{\max}} &= \rho \leq \rho_{\max} \\
 &= 1,04\% \leq 2,5\% \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 a &= A_s \times \frac{f_y}{(0,85 \times f_c' \times b)} \\
 &= 2454,369 \times \frac{420}{(0,85 \times 25 \times 400)} \\
 &= 121,275 \text{ mm} \\
 M_n &= A_s \times f_y \times (d - a/s) \\
 &= 2454,369 \times 420 \times \left(587,5 - \frac{121,275}{2}\right) / 10^6 \\
 &= 543,108 \text{ kNm} \\
 c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{121,275}{0,85} \\
 &= 142,676 \text{ mm} \\
 \epsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{(587,5 - 142,676)}{142,676} \times 0,003 \\
 &= 0,009 \\
 \Phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{0,009 - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,9 \\
 \Phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 543,108 \\
 &= 488,798 \text{ kNm} \\
 M_u \text{ Lapangan (+)} &= 177,805 \text{ kNm} \\
 \text{Cek Kapasitas} &= \phi M_n > M_u \\
 &= 488,798 > 177,805 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 A_s \text{ Perlu} &= \frac{M_u}{f_y \times (d - a/s)}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{177,805}{420 \times (526,863)/10^6}$$

$$= 803,522 \text{ mm}^2$$

5. Penulangan Geser

a) Geser Tumpuan

Gaya Desain

$$V_g \text{ Tumpuan} = 201,4722 \text{ kN}$$

$$A_s^+ \text{ Tumpuan} = 2454,369 \text{ mm}^2$$

$$A_s^- \text{ Tumpuan} = 2945,243 \text{ mm}^2$$

$$a_{pr}^+ = 1,25 \times a \text{ (tumpuan positif)}$$

$$= 1,25 \times 121,275$$

$$= 151,593 \text{ mm}$$

$$a_{pr}^- = 1,25 \times a \text{ (tumpuan negatif)}$$

$$= 1,25 \times 145,530$$

$$= 181,912 \text{ mm}$$

$$M_{pr}^+ = A_s^+ \times (1,25 f_y) \times (d - \frac{a_{pr}^+}{2})$$

$$= 2454,369 \times 2,35(420) \times (587,5 - \frac{151,593}{2})$$

$$= 659352149 \text{ Nmm}$$

$$M_{pr}^- = A_s^- \times (1,25 f_y) \times (d - \frac{a_{pr}^-}{2})$$

$$= 2945,243 \times 2,35(420) \times (587,5 - \frac{181,912}{2})$$

$$= 767782410 \text{ Nmm}$$

$$V_{sway} \text{ atau } V_{pr} = \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{L_n}$$

$$= \frac{659352149 + 767782410}{7350}$$

$$= 194168$$

$$V_e = V_g + V_{pr}$$

$$= 201,4722 + 194168$$

$$= 395640 \text{ N}$$

Tahanan Geser Beton

$$V_{pr} = 194168 \text{ N}$$

$$\frac{1}{2} V_e = 197820 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 P_u &= 35075 \text{ N} \\
 A_g \times \frac{f_c'}{20} &= 325000 \text{ N} \\
 V_c \text{ Diperhitungkan} &= V_c = 0 \text{ jika } V_{pr} \geq \frac{1}{2} V_e \text{ dan } P_u < A_g \times \frac{f_c'}{20} \\
 &= \mathbf{IYA} \\
 V_c &= 199750 \text{ N} \\
 \text{Penulangan Geser} & \\
 \text{Jumlah Kaki} &= 2 \\
 A_v &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2 \\
 &= 157,080 \text{ mm}^2 \\
 \text{Spasi} &= 100 \text{ mm} \\
 \text{Spasi Max 1} &= \frac{d}{4} \\
 &= \frac{587,5}{4} \\
 &= 146,88 \text{ mm} \\
 \text{Spasi Max 2} &= 6 \times d_b \\
 &= 6 \times 25 \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Spasi Max 3} &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Cek Spasi} &= \text{Spasi} \leq \min (\text{Spasi Max 1, Spasi Max 2,} \\
 \text{Spasi Max 3}) &= 100 \leq 146,88 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 V_s &= A_v \times f_{yv} \times \frac{d}{2} \\
 &= 157,080 \times 420 \times \frac{587,5}{2} \\
 &= 387594 \text{ N} \\
 \text{Batas } V_s &= 0,66 \times f_c'^{0,5} \times b \times d \\
 &= 0,66 \times 25^{0,5} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 775500 \text{ N} \\
 \Phi &= 0,75 \\
 V_n &= V_c + \min (V_s, \text{Batas } V_s)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 199750 + 387594 \\
 &= 587344 \text{ N} \\
 V_u &= 395640 \text{ N} \\
 \frac{\phi V_n}{V_u} &= 1,113 \\
 \text{Cek Kapasitas} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\
 &= 1,113 \geq 1 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

b) Geser Lapangan

Penulangan Geser

Jumlah Kaki = 2

$$\begin{aligned}
 A_v &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2 \\
 &= 157,080 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Spasi = 200 mm

Spasi Max

$$\begin{aligned}
 &= \frac{d}{4} \\
 &= \frac{587,5}{2} \\
 &= 293,75 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Cek Spasi = Spasi \leq Spasi Max

$$\begin{aligned}
 &= 200 \leq 293,75 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= A_v \times f_{yv} \times \frac{d}{2} \\
 &= 157,080 \times 420 \times \frac{587,5}{2} \\
 &= 193797 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Batas V_s

$$\begin{aligned}
 &= 0,66 \times f_c'^{0,5} \times b \times d \\
 &= 0,66 \times 25^{0,5} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 775500 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17 \times f_c'^{0,5} \times b \times d \\
 &= 0,17 \times 25^{0,5} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 199750 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi &= 0,75
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_n &= V_c + \min (V_s, \text{Batas } V_s) \\
 &= 199750 + 193797 \\
 &= 393547 \\
 V_u &= 201472,2 \text{ N} \\
 \frac{\phi V_n}{V_u} &= 1,465 \\
 \text{Cek Kapasitas} &= \frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \\
 &= 1,465 \geq 1 \qquad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

6. Penulangan Torsi

Parameter Geometri Penampang

$$\begin{aligned}
 A_{cp} &= b \times h \\
 &= 400 \times 650 \\
 &= 260000 \text{ mm}^2 \\
 P_{cp} &= 2 \times (b + h) \\
 &= 2 \times (400 + 650) \\
 &= 2100 \text{ mm} \\
 X_o &= b - 2c_c - d_s \\
 &= 400 - 2(40) - 10 \\
 &= 310 \text{ mm} \\
 Y_o &= h - 2c_c - d_s \\
 &= 650 - 2(40) - 10 \\
 &= 560 \text{ mm} \\
 A_{oh} &= X_o \times Y_o \\
 &= 310 \times 560 \\
 &= 173600 \text{ mm}^2 \\
 A_o &= 0,85 A_{oh} \\
 &= 0,85(173600) \\
 &= 147560 \text{ mm}^2 \\
 P_h &= 2 \times (X_o + Y_o) \\
 &= 2 \times (310 + 560) \\
 &= 1740 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

$$\begin{aligned}
 T_{cr} &= 0,33 \times f_c'^{0,5} \times \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \\
 &= 0,33 \times 25^{0,5} \times \frac{260000^2}{2100} \\
 &= 53114286 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\Phi = 0,75$$

$$\phi \frac{T_{cr}}{4} = 9958929 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Pengecekan Tulangan Torsi} &= T_u > \phi \frac{T_{cr}}{4} \\
 &= 52,5625 \times 10^6 > 9958929
 \end{aligned}$$

→ **IYA**

Pengecekan Kecukupan Dimensi Penampang

$$\text{Jenis Torsi} = \text{Kompabilitas}$$

$$T_u \text{ Pakai} = 39835714 \text{ Nmm}$$

$$V_u = 395640 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= 0,17 \times f_c'^{0,5} \times b \times d \\
 &= 0,17 \times 25^{0,5} \times 400 \times 587,5 \\
 &= 199750 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan Ultimate Geser+Torsi} &= \left(\frac{V_u}{b \times d} + \frac{T_u \times P_h}{1,7 \times A_{oh}^2} \right)^{0,5} \\
 &= \left(\frac{395640}{400 \times 587,5} + \frac{39835714 \times 1740}{1,7 \times 173600^2} \right)^{0,5} \\
 &= 2,160
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas Tegangan Beton} &= \phi \times \left(\frac{V_u}{b \times d} + 0,66 \times f_c'^{0,5} \right) \\
 &= 0,75 \times \left(\frac{395640}{400 \times 587,5} + 0,66 \times 25^{0,5} \right) \\
 &= 3,113
 \end{aligned}$$

$$\text{Cek Dimensi Penampang} = \text{Ruas Kiri} \leq \text{Ruas Kanan}$$

$$= 1,160 \leq 3,113 \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

Parameter Umum Lainnya

$$\frac{f_y}{f_{yt}} = 1$$

$$\theta = 45$$

a) Penulangan *Transversal* Torsi

$$n \text{ kaki tumpuan} = 2$$

$$n \text{ kaki lapangan} = 2$$

$$s \text{ Tumpuan} = 100 \text{ mm}$$

$$s \text{ Lapangan} = 200 \text{ mm}$$

$$s \text{ max 1} = \frac{P_h}{8} = \frac{1740}{8}$$

$$= 218 \text{ mm}$$

$$s \text{ max 2} = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Cek Spasi Tumpuan} = s \text{ Tumpuan} \leq \min (s \text{ max 1}, s \text{ max 2})$$

$$= 100 \leq 218 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{OK}$$

$$\text{Cek Spasi Lapangan} = s \text{ Lapangan} \leq \min (s \text{ max 1}, s \text{ max 2})$$

$$= 200 \leq 218 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{OK}$$

$$\frac{A_{v+t}}{s \text{ Tumpuan Pasang}}$$

$$= n \times \frac{\pi}{4} \times \frac{d_s^2}{s}$$

$$= 2 \times \frac{\pi}{4} \times \frac{10^2}{100}$$

$$= 6636,614 \text{ mm}$$

$$\frac{A_{v+t}}{s \text{ Lapangan Pasang}}$$

$$= n \times \frac{\pi}{4} \times \frac{d_s^2}{s}$$

$$= 2 \times \frac{\pi}{4} \times \frac{10^2}{200}$$

$$= 3318,307 \text{ mm}$$

$$\frac{A_t}{s}$$

$$= \frac{T_u}{2 \times \phi \times A_o \times f_{yv}}$$

$$= \frac{39835714}{92962800}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{A_v}{s \text{ Tumpuan Perlu}} & = 0,429 \text{ mm} \\
 & & = \frac{V_u \text{Tum}}{\phi \times V_c} \\
 & & = \frac{f_{yv} \times d}{f_{yv} \times d} \\
 & & = 1,328 \text{ mm} \\
 & \frac{A_v}{s \text{ Lapangan Perlu}} & = \frac{V_u \text{Lap}}{\phi \times V_c} \\
 & & = \frac{f_{yv} \times d}{f_{yv} \times d} \\
 & & = 0,279 \text{ mm} \\
 & \frac{A_{v+t}}{s \text{ Tumpuan Perlu}} & = 2 \times \frac{A_t}{s} + \frac{A_v}{s} \\
 & & = 2 \times 0,429 + 1,328 \\
 & & = 2,185 \\
 & \frac{A_{v+t}}{s \text{ Lapangan Perlu}} & = 2 \times \frac{A_t}{s} + \frac{A_v}{s} \\
 & & = 2 \times 0,429 + 0,279 \\
 & & = 1,136 \\
 & \frac{A_{v+t}}{s \text{ min 1}} & = 0,062 \times f_c^{0,5} \times \frac{b}{f_{yv}} \\
 & & = 0,062 \times 25^{0,5} \times \frac{400}{420} \\
 & & = 0,295 \\
 & \frac{A_{v+t}}{s \text{ min 2}} & = 0,35 \times \frac{b}{f_{yv}} \\
 & & = 0,35 \times \frac{400}{420} \\
 & & = 0,333 \\
 & \text{Cek Geser + Torsi Tumpuan} & = \frac{A_{v+t}}{s \text{ Tumpuan Pasang}} \geq \\
 & & \frac{A_{v+t}}{s \text{ Tumpuan Perlu}} \\
 & & = 6636,614 \geq 2,185 \rightarrow \text{OK} \\
 & \text{Cek Geser + Torsi Lapangan} & = \frac{A_{v+t}}{s \text{ Lapangan Pasang}} \geq \\
 & & \frac{A_{v+t}}{s \text{ Lapangan Perlu}} \\
 & & = 3318,307 \geq 1,136 \rightarrow \text{OK} \\
 & \text{b) Penulangan } \textit{Longitudinal} \text{ Torsi} & \\
 & d_b \text{ atau } d_{bt} & = 13 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_b, \text{ min} &= 0,042 \text{ s} \\
 &= 0,042 \times 200 \\
 &= 8,4 \text{ mm} \\
 \text{Cek } d_b &= d_b \geq d_b \text{ min} \\
 &= 13 \geq 8,4 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 A_s \text{ Perlu Tumpuan Atas} &= 2463,599 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ Perlu Tumpuan Bawah} &= 1622,952 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ Perlu Lapangan Atas} &= 1133,916 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ Perlu Lapangan Bawah} &= 803,522 \text{ mm}^2 \\
 A_l &= \frac{A_t}{s} \times P_h \\
 &= 0,429 \times 1740 \\
 &= 745,612 \text{ mm}^2 \\
 A_l \text{ min} &= 0,42 \times f_c'^{0,5} \times \frac{A_{cp}}{f_{yv}} - \frac{A_t}{s} \times P_h \\
 &= 0,42 \times 25^{0,5} \times \frac{260000}{420} - 0,429 \times 1740 \\
 &= 554,388 \text{ mm}^2 \\
 A_s + A_l \text{ Perlu Tumpuan} &= 6550,150 \text{ mm}^2 \\
 A_s + A_l \text{ Perlu Lapangan} &= 4401,037 \text{ mm}^2 \\
 n \text{ Tumpuan Atas} &= 6 \\
 n \text{ Tumpuan Tengah} &= 10 \\
 n \text{ Tumpuan Bawah} &= 5 \\
 n \text{ Tumpuan Vertikal} &= 2 + \frac{n \text{ Teng}}{2} \\
 &= 2 + \frac{10}{2} \\
 &= 7 \\
 n \text{ Lapangan Atas} &= 5 \\
 n \text{ Lapangan Tengah} &= 2 \\
 n \text{ Lapangan Bawah} &= 5 \\
 n \text{ Tumpuan Vertikal} &= 2 + \frac{n \text{ Teng}}{2} \\
 &= 2 + \frac{2}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 3 \\
\text{Spasi Horizontal Tumpuan} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{(\min(n \text{ atas}, n \text{ bawah}) - 1)} \\
&= 69 \text{ mm} \\
\text{Spasi Vertikal Tumpuan} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{n \text{ Vertikal} - 1} \\
&= 88 \text{ mm} \\
\text{Spasi Horizontal Lapangan} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{(\min(n \text{ atas}, n \text{ bawah}) - 1)} \\
&= 69 \text{ mm} \\
\text{Spasi Vertikal Lapangan} &= \frac{b - 2c_c - 2d_s - d_b}{n \text{ Vertikal} - 1} \\
&= 263 \text{ mm} \\
\text{Cek Spasi Tul } \textit{Longitudinal} \text{ Tumpuan} &= \text{Max (spasi tumpuan)} \leq 300 \text{ mm} \\
&= 88 \leq 300 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
\text{Cek Spasi Tul } \textit{Longitudinal} \text{ Lapangan} &= \text{Max (spasi lapangan)} \leq 300 \text{ mm} \\
&= 263 \leq 300 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
A_s + A_l \text{ Pasang Tumpuan} &= 6726,935 \text{ mm}^2 \\
A_s + A_l \text{ Pasang Lapangan} &= 5174,203 \text{ mm}^2 \\
\text{Cek Lentur + Torsi Tumpuan} &= A_s + A_l \text{ Pasang} \geq A_s + A_l \text{ Perlu} \\
&= 6726,935 \geq 6550,150 \text{ mm}^2 \\
&\quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
\text{Cek Lentur + Torsi Lapangan} &= A_s + A_l \text{ Pasang} \geq A_s + A_l \text{ Perlu} \\
&= 5174,203 \geq 4401,037 \text{ mm}^2 \\
&\quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis dan desain yang telah dilakukan pada elemen balok, diperoleh nilai kebutuhan luas tulangan (A_s) serta kapasitas momen lentur yang harus dipenuhi pada daerah tumpuan dan lapangan. Perhitungan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi pembebanan yang bekerja, nilai momen rencana (M_u), serta ketentuan perencanaan beton bertulang sesuai standar yang berlaku. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut disusun dalam bentuk rekapitulasi guna memudahkan proses evaluasi terhadap kesesuaian antara luas tulangan yang dibutuhkan (A_s perlu) dengan luas tulangan yang dipasang (A_s

pasang), serta untuk memastikan bahwa kapasitas lentur nominal tereduksi (ϕM_n) telah memenuhi persyaratan terhadap momen rencana. Rekapitulasi hasil perhitungan tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 31 Rekapitulasi Perhitungan Lentur Tulangan Balok

| Tipe Balok | Dimensi Balok | Tulangan | | | | As Perlu | | | | As Pasang | | | |
|------------|---------------|----------|------|----------|------|----------|--------|----------|--------|-----------|--------|----------|--------|
| | | Tumpuan | | Lapangan | | Tumpuan | | Lapangan | | Tumpuan | | Lapangan | |
| | | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | - |
| B1 | 400 x 650 | 5D25 | 6D25 | 5D25 | 5D25 | 1622,9 | 2463,5 | 803,5 | 1133,9 | 2454,3 | 2945,2 | 2454,3 | 2454,3 |
| B1* | 400 x 650 | 4D19 | 5D19 | 5D19 | 5D19 | 930,6 | 1257,9 | 930,6 | 1257,9 | 1134,1 | 1417,6 | 1134,1 | 1417,6 |
| B2 | 300 x 450 | 3D19 | 4D19 | 4D19 | 3D19 | 599,2 | 919,6 | 646,4 | 919,6 | 850,5 | 1134,1 | 850,5 | 1134,1 |
| BK2 | 300 x 400 | 3D19 | 5D19 | 5D19 | 3D19 | 717,1 | 1165,4 | 717,1 | 1165,4 | 850,5 | 1417,6 | 850,5 | 1417,6 |
| BL | 250 x 450 | 3D19 | 3D19 | 3D19 | 3D19 | 634,6 | 623,1 | 634,6 | 623,1 | 850,5 | 850,5 | 850,5 | 850,5 |
| BA2 | 250 x 350 | 2D16 | 2D16 | 2D16 | 2D16 | 62,0 | 105,9 | 195,54 | 316,0 | 402,1 | 402,1 | 402,1 | 402,1 |
| BA1 | 250 x 450 | 3D16 | 4D16 | 4D16 | 3D16 | 392,0 | 586,4 | 392,0 | 586,4 | 603,1 | 804,2 | 603,1 | 804,2 |

Tabel 4. 32 Rekapitulasi Perhitungan Lentur Tulangan Balok

| Tipe Balok | Dimensi Balok | Mu | | | | ØMn | | | |
|------------|---------------|---------|-------|----------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Tumpuan | | Lapangan | | Tumpuan | | Lapangan | |
| | | + | - | + | - | + | - | + | - |
| B1 | 400 x 650 | 359,1 | 532,6 | 177,8 | 250,9 | 488,7 | 573,0 | 488,7 | 488,7 |
| B1* | 400 x 650 | 218,6 | 291,8 | 218,6 | 291,8 | 239,8 | 296,0 | 239,8 | 296,0 |
| B2 | 300 x 450 | 91,2 | 136,3 | 98,4 | 136,3 | 116,5 | 151,3 | 116,5 | 151,3 |
| BK2 | 300 x 400 | 94,1 | 143,8 | 94,1 | 143,8 | 100,4 | 157,4 | 100,4 | 157,4 |
| BL | 250 x 450 | 95,1 | 93,1 | 95,1 | 93,1 | 114,7 | 114,7 | 114,7 | 114,7 |
| BA2 | 250 x 350 | 7,1 | 12,2 | 22,6 | 36,6 | 41,9 | 41,9 | 41,9 | 41,97 |
| BA1 | 250 x 450 | 60,63 | 88,72 | 60,63 | 88,72 | 83,94 | 109,5 | 83,94 | 109,5 |

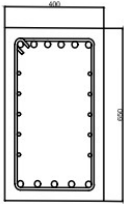
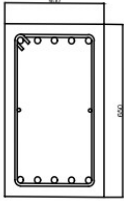
Tabel 4. 33 Rekapitulasi Perhitungan Geser Tulangan Balok

| Tipe Balok | Vu | | Tulangan Geser | | Vn | |
|------------|---------|----------|----------------|----------|---------|----------|
| | Tumpuan | Lapangan | Tumpuan | Lapangan | Tumpuan | Lapangan |
| B1 | 395640 | 201472,2 | D10-100 | D10-200 | 587344 | 393547 |
| B1* | 296545 | 345378,1 | D13-100 | D13-200 | 655034 | 527267 |
| B2 | 152748 | 106106,6 | D10-100 | D10-125 | 286251 | 314266 |
| BK2 | 231504 | 108260 | D10-100 | D10-125 | 367627 | 274027 |
| BL | 154418 | 84924 | D10-100 | D10-125 | 322033 | 297670 |
| BA2 | 32426 | 21250,2 | D10-100 | D10-100 | 302950 | 254692 |
| BA1 | 106192 | 71727,2 | D10-100 | D10-125 | 323400 | 298813 |

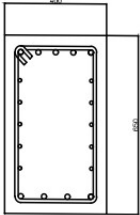
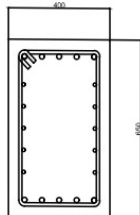
Tabel 4. 34 Rekapitulasi Perhitungan Torsi Tulangan Balok

| Tipe Balok | As Perlu | | Tulangan Torsi | | As Pasang | |
|------------|----------|----------|----------------|----------|-----------|----------|
| | Tumpuan | Lapangan | Tumpuan | Lapangan | Tumpuan | Lapangan |
| B1 | 6550,150 | 4401,037 | 10D13 | 2D13 | 6726,935 | 5174,203 |
| B1* | 3446,491 | 3446,491 | 10D13 | 10D13 | 3879,082 | 3879,082 |
| B2 | 2438,516 | 2485,699 | 4D13 | 4D13 | 2515,630 | 2515,630 |
| BK2 | 3048,136 | 3048,136 | 10D10 | 10D10 | 3053,628 | 3053,628 |
| BL | 1892,548 | 1892,548 | 4D10 | 4D10 | 2015,332 | 2015,332 |
| BA2 | 273,923 | 617,526 | 2D10 | 2D10 | 961,327 | 961,327 |
| BA1 | 1564,907 | 1564,907 | 4D10 | 4D10 | 1721,593 | 1721,593 |

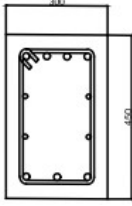
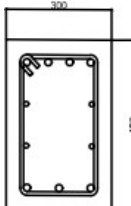
Tabel 4. 35 Detail Balok B1

| Dimensi Balok | 400 x 650 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok B1 |  |  |
| Tulangan Atas | 6D25 | 5D25 |
| Tulangan Bawah | 5D25 | 5D25 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 200 |
| Tulangan Samping | 10D13 | 2D13 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | f'c 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

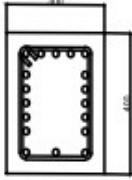
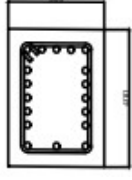
Tabel 4. 36 Detail Balok B1*

| Dimensi Balok | 400 x 650 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok B1* |  |  |
| Tulangan Atas | 5D19 | 5D19 |
| Tulangan Bawah | 4D19 | 5D19 |
| Sengkang | D13 - 100 | D13 - 200 |
| Tulangan Samping | 10D13 | 10D13 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | f'c 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

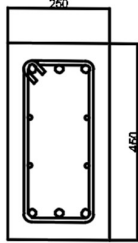
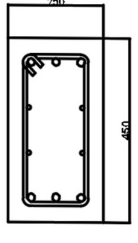
Tabel 4. 37 Detail Balok B2

| Dimensi Balok | 300 x 450 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok B2 |  |  |
| Tulangan Atas | 4D19 | 4D19 |
| Tulangan Bawah | 3D19 | 3D19 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 125 |
| Tulangan Samping | 4D13 | 4D13 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

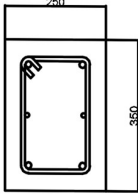
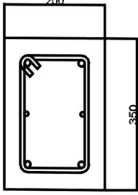
Tabel 4. 38 Detail Balok BK2

| Dimensi Balok | 300 x 400 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok BK2 |  |  |
| Tulangan Atas | 5D19 | 5D19 |
| Tulangan Bawah | 3D19 | 3D19 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 125 |
| Tulangan Samping | 10D19 | 10D19 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

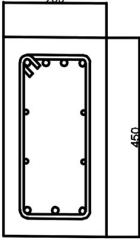
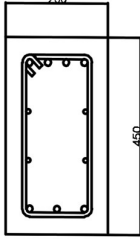
Tabel 4. 39 Detail Balok BL

| Dimensi Balok | 250 x 450 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok BL |  |  |
| Tulangan Atas | 3D19 | 3D19 |
| Tulangan Bawah | 3D19 | 3D19 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 125 |
| Tulangan Samping | 4D10 | 4D10 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

Tabel 4. 40 Detail Balok BA2

| Dimensi Balok | 250 x 350 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok BA2 |  |  |
| Tulangan Atas | 2D16 | 2D16 |
| Tulangan Bawah | 2D16 | 2D16 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 100 |
| Tulangan Samping | 2D10 | 2D10 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

Tabel 4. 41 Detail Balok BA1

| Dimensi Balok | 250 x450 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Balok BA1 |  |  |
| Tulangan Atas | 4D16 | 4D16 |
| Tulangan Bawah | 3D16 | 3D16 |
| Sengkang | D10 - 100 | D10 - 125 |
| Tulangan Samping | 4D10 | 4D10 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | f'_c 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | F_y 420 MPa | |

4.6.2 Penulangan Struktur Kolom

1. Properti Material dan Penampang

| | |
|---|--------------|
| Jenis Kolom | = K1 |
| Panjang/Tinggi Kolom, L | = 4000 mm |
| Sisi Pendek Kolom, b | = 650 mm |
| Sisi Panjang Kolom, h | = 650 mm |
| Diameter Tulangan <i>Longitudinal</i> , d_b | = 25 mm |
| Diameter Tulangan Sengkang, d_s | = 16 mm |
| Selimit Bersih, c_c | = 40 mm |
| Kuat Tekan Beton, f'_c | = 25 MPa |
| Kuat Leleh Tul. <i>Longitudinal</i> , f_y | = 420 MPa |
| Kuat Leleh Tul. <i>Transversal</i> , f_{yv} | = 420 MPa |
| Tinggi Balok, h_b | = 450 mm |
| L_n | = $L - h_b$ |
| | = 4000 - 450 |
| | = 3550 mm |

2. Gaya Dalam Kolom

Gaya dalam kolom merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan struktur yang digunakan untuk menentukan kebutuhan dimensi dan penulangan kolom. Gaya dalam yang ditinjau meliputi gaya aksial (P), momen lentur terhadap sumbu utama ($M2$ dan $M3$), serta gaya geser (V) yang bekerja pada elemen kolom akibat kombinasi pembebanan yang terjadi. Nilai gaya dalam ini diperoleh dari hasil analisis struktur dan digunakan sebagai dasar dalam proses desain elemen kolom agar mampu menahan beban yang bekerja secara aman. Data gaya aksial dan momen kolom disajikan pada **Tabel 4.42**, sedangkan data gaya geser kolom disajikan pada **Tabel 4.43**.

Tabel 4. 42 Data Gaya Aksial Kolom

| Kondisi | P (kN) | M2 (kNm) | M3 (kNm) |
|---------|----------|----------|----------|
| P max | 644,453 | 216,653 | 195,996 |
| P min | 3009,777 | 33,378 | 91,339 |
| M2 max | 625,573 | 635,480 | 267,671 |
| M2 min | 2253,559 | 673,346 | 254,707 |
| M3 max | 1226,593 | 302,462 | 522,805 |
| M3 min | 760,731 | 223,909 | 505,984 |

Tabel 4. 43 Data Gaya Geser Kolom

| Tumpuan | |
|----------|----------|
| V2 (kN) | 439,5927 |
| V3 (kN) | 571,7843 |
| Lapangan | |
| V2 (kN) | 439,593 |
| V3 (kN) | 571,784 |

Gaya Tekan

$$N_u = 1,2086 \text{ kN}$$

3. Syarat Gaya dan Geometri

$$\begin{aligned} \text{Syarat Gaya Aksial} &= P_u > 0,1 \times A_g \times f'_c \\ &= 3009777 > 1056250 \quad \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Syarat Sisi Terpendek} &= b \geq 300 \text{ mm} \\ &= 650 \geq 300 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

| | | |
|--|---|-------------|
| Syarat Rasio Dimensi Penampang | $= \frac{b}{h} \geq 0,4$ $= \frac{650}{650} \geq 0,4$ | → OK |
| 4. Pengecekan Terhadap Gaya Dalam Aksial – Lentur | | |
| Jumlah Tulangan, n | = 16 | |
| Luas Tulangan <i>Longitudinal</i> , As | $= n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$ $= 16 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2$ $= 7854 \text{ mm}^2$ | |
| Rasio Tulangan, ρ | $= \frac{A_s}{b \times h}$ $= \frac{7854}{650 \times 650}$ $= 1,86\%$ | |
| Cek ρmin dan ρmax | $= 1\% \leq \rho \leq 6\%$ $= 1\% \leq 1,86\% \leq 6\%$ | → OK |
| 5. Pengecekan <i>Strong Coloumn – Weak Beam</i> (SCWB) | | |
| Momen Nominal Kolom, Mnc | = 713,28 kNm | |
| M_n^- Tumpuan Balok | = 636,728 kNm | |
| M_n^+ Tumpuan Balok | = 543,108 kNm | |
| Cek SCWB | $= 2 \times M_{nc} \geq 1,2 \times (M_n^- + M_n^+)$ $= 2(713,28) \geq 1,2(636,728 + 543,108)$ | → OK |
| 6. Panjang Zona Sendi Plastis | | |
| l_{01} | $= h$ $= 650 \text{ mm}$ | |
| l_{02} | $= \frac{L_n}{6}$ $= \frac{3550}{6}$ $= 591,7 \text{ mm}$ | |
| l_{03} | = 450 mm | |
| l_0 | $= \text{Max}(l_{01}; l_{02}; l_{03})$ $= 650 \text{ mm}$ | |

7. Tulangan *Transversal* Zona Sendi Palstis/Tumpuan

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Kaki Sisi Pendek, } n_1 &= 2 \\
 \text{Jumlah Kaki Sisi Panjang, } n_2 &= 2 \\
 \text{Spasi, } s &= 100 \text{ mm} \\
 \text{Spasi Kaki Terbesar, } x_i \text{ max} &= 150 \text{ mm} \\
 A_{sh1} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 402,124 \text{ mm}^2 \\
 A_{sh2} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 402,124 \text{ mm}^2 \\
 \frac{A_{sh}}{s}, 1 &= 4,021 \\
 \frac{A_{sh}}{s}, 2 &= 4,021
 \end{aligned}$$

8. Confinement/ Kekangan Zona Sendi Plastis

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar Penampang Inti Beton, } b_c &= b - 2c_c \\
 &= 650 - 2(40) \\
 &= 570 \text{ mm} \\
 \text{Panjang Penampang Inti Beton, } h_c &= h - 2c_c \\
 &= 650 - 2(40) \\
 &= 570 \text{ mm} \\
 \text{Luas Penampang Kolom, } A_g &= b \times h \\
 &= 650 \times 650 \\
 &= 422500 \text{ mm}^2 \\
 \text{Luas Penampang Inti Beton, } A_{ch} &= b_c \times h_c \\
 &= 570 \times 570 \\
 &= 324900 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Sisi Pendek/ Sumbu Lemah

$$\frac{A_{sh}}{s} \text{ min, } 1 = 0,3 \left(b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,058 \text{ mm}^2 \\
 \frac{A_{sh}}{s} \text{ min, 2} &= 0,09 \times b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \\
 &= 3,054 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } \frac{A_{sh}}{s} \text{ 1} &= \frac{A_{sh}}{s} \text{ 1} \geq \max\left(\frac{A_{sh}}{s} \text{ min 1}, \frac{A_{sh}}{s} \text{ min 2}\right) \\
 &= 3,982 \geq 3,058 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

Sisi Panjang/ Sumbu Kuat

$$\begin{aligned}
 \frac{A_{sh}}{s} \text{ min, 1} &= 0,3 \left(b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}}\right) \times \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1\right) \\
 &= 3,058 \text{ mm}^2 \\
 \frac{A_{sh}}{s} \text{ min, 2} &= 0,09 \times b_c \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \\
 &= 3,054 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } \frac{A_{sh}}{s} \text{ 2} &= \frac{A_{sh}}{s} \text{ 2} \geq \max\left(\frac{A_{sh}}{s} \text{ min 1}, \frac{A_{sh}}{s} \text{ min 2}\right) \\
 &= 3,982 \geq 3,058 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

Cek Spasi

$$\begin{aligned}
 s_{max, 1} &= \frac{b}{4} \\
 &= \frac{650}{4} \\
 &= 162,5 \text{ mm} \\
 s_{max, 2} &= 6 \times d_b \\
 &= 6 \times 25 \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 H_x &= x_{i \text{ max}} \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 s_{max, 2} = s_o &= 100 \leq 100 + \frac{350 - H_x}{3} \leq 150 \\
 &= 100 \leq 100 + \frac{350 - 150}{3} \leq 150 \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 s_{max} &= \text{Min}(s_{max1}, s_{max2}, s_{max3}) \\
 &= 150 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Spasi} &= s \leq s_{max} \\ &= 100 \leq 150 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \end{aligned}$$

9. Kuat Geser Zona Sendi Plastis

Gaya Geser Desain

$$M_{pr} \text{ Kolom (SP Coloumn)} = 1124,508 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} V_{u1} &= 2 \times \frac{M_{pr} \text{ Kolom}}{L_n} \\ &= 2 \times \frac{1124,508}{3550} \\ &= 633525 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya Geser Hasil Analisa Struktur

$$V_{u2}, \text{ Sumbu Lemah} = 439593 \text{ N}$$

$$V_{u2}, \text{ Sumbu Kuat} = 571784 \text{ N}$$

Tahanan Geser Beton Sumbu Lemah

$$\begin{aligned} V_u &= \text{Max} (V_{u1}, V_{u2}) \\ &= 633525 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\Phi = 0,75$$

$$\begin{aligned} V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g}\right) \times f_c'^{0,5} \times h \times (b - c_c \\ &\quad - d_s - d_b/s) \\ &= 321344 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_s \text{ Perlu} &= \frac{V_u}{\Phi} - V_c \\ &= \frac{633525}{0,75} - 323002 \\ &= 523356 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_s}{s} \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{f_{yv} \times (b - c_c - d_s - d_b/s)} \\ &= 2,1429 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{A_s}{s} \text{ Min 1} &= 0,062 \times f_c'^{0,5} \times \frac{h}{f_{yv}} \\ &= 0,062 \times 25^{0,5} \times \frac{650}{420} \\ &= 0,4798 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\frac{A_s}{s} \text{ Min 2} = 0,35 \times \frac{h}{f_{yv}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,35 \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,5417 \text{ mm} \\
 \text{Cek } \frac{A_s}{s} &= \frac{A_{sh}}{s} \geq \text{Max} \left(\frac{A_s}{s} \text{ Perlu}, \frac{A_s}{s} \text{ Min} \right) \\
 &= 4,021 \geq 2,1251 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

Tahanan Geser Beton Sumbu Kuat

$$\begin{aligned}
 V_u &= \text{Max} (V_{u1}, V_{u2}) \\
 &= 633525 \text{ N} \\
 \Phi &= 0,75 \\
 V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \times f_c'^{0,5} \times h \times (b \\
 &\quad - c_c - d_s - d_b/s)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 321344 \text{ N} \\
 V_s \text{ Perlu} &= \frac{V_u}{\Phi} - V_c \\
 &= \frac{633525}{0,75} - 323002 \\
 &= 523356 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{A_s}{s} \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{f_{yv} \times (b - c_c - d_s - d_b/s)} \\
 &= 2,1429 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{A_s}{s} \text{ Min 1} &= 0,062 \times f_c'^{0,5} \times \frac{h}{f_{yv}} \\
 &= 0,062 \times 25^{0,5} \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,4798 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\frac{A_s}{s} \text{ Min 2} = 0,35 \times \frac{h}{f_{yv}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,35 \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,5417 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Cek } \frac{A_s}{s} &= \frac{A_{sh}}{s} \geq \text{Max} \left(\frac{A_s}{s} \text{ Perlu}, \frac{A_s}{s} \text{ Min} \right) \\
 &= 3,982 \geq 2,1251 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

10. Tulangan *Transversal* Luar Zona Sendi Plastis/Tumpuan

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Kaki Sisi Pendek, } n_1 &= 2 \\
 \text{Jumlah Kaki Sisi Panjang, } n_2 &= 2 \\
 \text{Spasi, } s &= 150 \text{ mm} \\
 A_v \text{ Sumbu Lemah} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 402,124 \text{ mm}^2 \\
 A_v \text{ Sumbu Kuat} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\
 &= 2 \times \frac{\pi}{4} \times 13^2 \\
 &= 402,124 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

11. *Confinement*/Kekangan Luar Zona Sendi Plastis

$$\begin{aligned}
 \text{Spasi max 1} &= 6 \times d_b \\
 &= 6 \times 25 \\
 &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Spasi max 2} &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Cek Spasi} &= \text{Spasi} \leq \min(\text{spasi 1, spasi 2}) \\
 &= 150 \leq 150 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

12. Kuat Geser Luar Zona Sendi Plastis

Tahanan Geser Beton Sumbu Lemah

$$\begin{aligned}
 V_u &= 439593 \text{ N} \\
 \Phi &= 0,75 \\
 V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \times f_c^{10,5} \times h \times (b \\
 &\quad - c_c - d_s - \frac{d_b}{s}) \\
 &= 321344 \text{ N} \\
 V_s \text{ Perlu} &= \text{Max} \left(\frac{V_u}{\Phi} - V_c \right) \\
 &= \text{Max} \left(\frac{439593}{0,75} - 323002 \right) \\
 &= 264779 \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{f_{yv} \times (b - c_c - d_s - \frac{d_b}{s})}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,0841 \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Min 1} &= 0,062 \times f_c'^{0,5} \times \frac{h}{f_{yv}} \\
 &= 0,062 \times 25^{0,5} \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,4798 \text{ mm} \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Min 2} &= 0,35 \times \frac{h}{f_{yv}} \\
 &= 0,35 \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,5417 \text{ mm} \\
 \text{Cek } \frac{A_s}{s} &= \frac{A_{sh}}{s} \geq \max \left(\frac{A_v}{s} \text{ perlu}, \frac{A_v}{s} \text{ min } 1, \frac{A_v}{s} \text{ min} \right) \\
 2) &= 402,124 / 150 \geq 1,0841 \text{ mm} \\
 &= 2,681 \geq 1,0841 \text{ mm} \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

Tahanan Geser Beton Sumbu Kuat

$$\begin{aligned}
 V_u &= 439593 \text{ N} \\
 \Phi &= 0,75 \\
 V_c &= 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \times f_c'^{0,5} \times h \times \left(b - c_c - d_s - \frac{d_b}{s} \right) \\
 &= 321344 \text{ N} \\
 V_s \text{ Perlu} &= \text{Max} \left(\frac{V_u}{\Phi} - V_c \right) \\
 &= \text{Max} \left(\frac{439593}{0,75} - 321344 \right) \\
 &= 264779 \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Perlu} &= \frac{V_s}{f_{yv} \times \left(b - c_c - d_s - \frac{d_b}{s} \right)} \\
 &= 1,0841 \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Min 1} &= 0,062 \times f_c'^{0,5} \times \frac{h}{f_{yv}} \\
 &= 0,062 \times 25^{0,5} \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,4798 \text{ mm} \\
 \frac{A_s}{s} \text{ Min 2} &= 0,35 \times \frac{h}{f_{yv}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,35 \times \frac{650}{420} \\
 &= 0,5417 \text{ mm} \\
 \text{Cek } \frac{A_s}{s} &= \frac{A_{sh}}{s} \geq \max \left(\frac{A_v}{s} \text{ perlu}, \frac{A_v}{s} \text{ min } 1, \frac{A_v}{s} \text{ min} \right) \\
 2) &= \frac{402,124}{150} \geq 1,0841 \text{ mm} \\
 &= 2,681 \geq 1,0841 \text{ mm} \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada elemen kolom, diperoleh kebutuhan tulangan *longitudinal* serta tulangan *transversal* (senggang) yang harus dipenuhi untuk menjamin kekuatan dan daktilitas struktur. Perencanaan kolom mempertimbangkan kombinasi beban aksial dan momen yang bekerja, serta ketentuan desain beton bertulang sesuai standar yang berlaku. Selain itu, dilakukan pengecekan terhadap rasio tulangan untuk memastikan bahwa jumlah tulangan yang digunakan berada dalam batas minimum dan maksimum yang diizinkan. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut disusun dalam bentuk rekapitulasi guna memudahkan evaluasi kesesuaian antara tulangan yang dibutuhkan dengan tulangan yang dipasang, baik pada daerah sendi plastis (tumpuan) maupun di luar sendi plastis (lapangan). Rekapitulasi hasil perhitungan tulangan kolom disajikan pada tabel berikut.

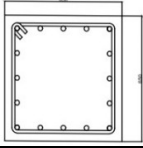
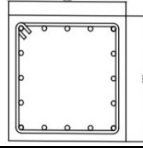
Tabel 4. 44 Rekapitulasi Perhitungan Tulangan Kolom

| Tipe Kolom | Dimensi | Tulangan Utama | | Senggang | | Rasio Tulangan |
|------------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|
| | | Tumpuan | Lapangan | Tumpuan | Lapangan | |
| K1 | 650 x 650 | 16D25 | 16D25 | D13-100 | D13-150 | 1,86% |
| K2 | 350 x 350 | 12D19 | 12D19 | D16-100 | D16-125 | 2,78% |
| KL | 350 x 350 | 12D19 | 12D19 | 3D16-100 | 3D16-100 | 2,78% |

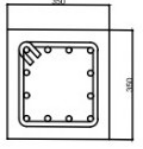
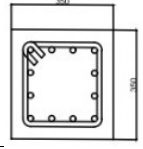
Tabel 4. 45 Rekapitulasi Perhitungan Tulangan Kolom

| Tipe Kolom | Tumpuan (Sendi Plastis) | | | | Lapangan (Di Luar Sendi Plastis) | | | |
|------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Ash/s Perlu | | Ash/s Pakai | | Ash/s Perlu | | Ash/s Pakai | |
| | Sumbu Kuat | Sumbu Lemah | Sumbu Kuat | Sumbu Lemah | Sumbu Kuat | Sumbu Lemah | Sumbu Kuat | Sumbu Lemah |
| K1 | 2,142 | 2,142 | 4,021 | 4,021 | 1,805 | 1,084 | 2,680 | 2,680 |
| K2 | 2,279 | 2,279 | 5,027 | 5,027 | 0,334 | 0,334 | 4,021 | 4,021 |
| KL | 8,936 | 8,936 | 5,947 | 2,177 | 6,702 | 6,702 | 5,9479 | 1,664 |

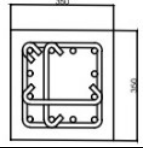
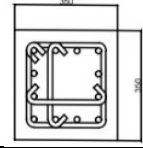
Tabel 4. 46 Detail Kolom K1

| Dimensi Kolom | 650 x650 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Kolom K1 |  |  |
| Tulangan Utama | 16D25 | 16D25 |
| Sengkang | D16 - 100 | D16 - 150 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

Tabel 4. 47 Detail Kolom K2

| Dimensi Kolom | 350 x350 | |
|--------------------|--|--|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Kolom K2 |  |  |
| Tulangan Utama | 12D19 | 12D19 |
| Sengkang | D16 - 100 | D16 - 125 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

Tabel 4. 48 Detail Kolom KL

| Dimensi Kolom | 350 x350 | |
|--------------------|---|---|
| Posisi Bentang | Tumpuan (L/4) | Lapangan (L/4) |
| Kolom KL |  |  |
| Tulangan Utama | 12D19 | 12D19 |
| Sengkang | 3D16 - 100 | 3D16 - 100 |
| Selimit Beton | 40 mm | |
| Mutu Beton | $f'c$ 25 MPa | |
| Mutu Baja Tulangan | Fy 420 MPa | |

4.6.3 Penulangan Struktur Pelat

1. Properti Material dan Penampang

| | |
|-----------------------------------|---|
| Panjang Pelat Arah Sumbu 1, L_1 | = 4500 mm |
| Panjang Pelat Arah Sumbu 2, L_2 | = 8000 mm |
| Tebal Pelat, t | = 135 mm |
| Diameter Tulangan, d_b | = 10 mm |
| Selimut Bersih, c_c | = 20 mm |
| Tebal Efektif Penampang, d | = $h - c_c - d_s - \frac{d_b}{2}$ |
| | = $135 - 20 - 13 - \frac{13}{2}$ |
| | = 95,5 mm |
| Kuat Tekan Beton, f_c' | = 25 MPa |
| Kuat Leleh Tulangan, f_y | = 420 MPa |
| Modulus Elastisitas Beton, E_c | = $4700 \times \sqrt{f_c'}$ |
| | = $4700 \times \sqrt{25}$ |
| | = 23500 |
| β_1 | = $0,65 \leq 0,85 - 0,05 \times (f_c' - 28) / 7 \leq$ |
| 0.85 | = 0,85 |
| λ | = 1 |

2. Gaya Dalam

| | |
|----------------------|--------------|
| M Max akibat M22 Max | = 7,571 kNm |
| M Min akibat M22 Min | = 9,794 kNm |
| M Max akibat M11 Max | = 7,571 kNm |
| M Min akibat M11 Min | = 15,772 kNm |
| V_u | = 18,452 kN |

3. Penulangan Lentur (Analisa Untuk Per Meter Lari)

a) Momen Positif M22 (Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu 1 (X))

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Spasi Tulangan, s | = 200 |
| Spasi Maksimum, s_{max} | = $2 \times t$ dan 450 mm |
| | = 2×135 |

$$= 270 \text{ mm}$$

Cek Spasi Maksimum $= s \leq s_{\max}$

$$= 200 \leq 270 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, $n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s}$ [Analisis untuk per 1 m]

$$= \frac{1000}{200}$$

$$= 5$$

d_b $= 10 \text{ mm}$

Jarak Bersih Antar Tulangan $= s - d_b$

$$= 200 - 10$$

$$= 190 \text{ mm}$$

Cek Jarak Bersih $= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ Mm}$

$$= 190 \geq 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

A_s Pasang $= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$

$$= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2$$

$$= 392,699 \text{ mm}^2$$

A_s min ($f_y < 420 \text{ MPa}$) $= 0,2\% \times b \times t$

$$= 0,2\% \times 1000 \times 135$$

$$= 270 \text{ mm}^2$$

A_s min ($f_y \geq 420 \text{ MPa}$) $= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times t \text{ dan } 0,14\% \times b$

$\times t$ $= (0,18\% \times \frac{420}{420}) \times 1000 \times 135 \text{ dan}$

$$0,14\% \times 1000 \times 13$$

$$= 243 \text{ mm}^2$$

Cek A_s min $= A_s \text{ Pasang} \geq A_s \text{ min}$

$$= 392,699 \geq 243 \text{ MPa} \rightarrow \quad \mathbf{OK}$$

Tinggi Blok Beton, a $= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b}$

$$= 392,699 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000}$$

$$= 7,762 \text{ mm}$$

Kapasitas Lentur, M_n $= A_s \times f_y \times (d - \frac{a}{2})$

$$\begin{aligned}
 &= 392,699 \times 420 \times \left(95,5 - \frac{13,117}{2}\right) \\
 &= 15,853 \text{ kNm} \\
 \text{Lokasi Garis Netral, } c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{7,762}{0,85} \\
 &= 9,131 \text{ mm} \\
 \text{Regangan Tulangan Tarik, } \varepsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{1000 - 9,131}{9,131} \times 0,003 \\
 &= 0,030 \\
 \text{Faktor Reduksi, } \phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\varepsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,9 \\
 \text{Kapabilitas Lentur Tereduksi, } \phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 15,853 \\
 &= 14,268 \text{ kNm} \\
 \text{Momen Ultimit, } M_u &= 7,571 \text{ kNm} \\
 \text{Cek Kapabilitas} &= \phi M_n > M_u \\
 &= 14,268 > 7,571 \text{ kNm} \\
 &\hspace{15em} \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{b) Momen Negatif M22 (Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu 1 (X))} \\
 \text{Spasi Tulangan, } s &= 200 \\
 \text{Spasi Maksimum, } s_{max} &= 2 \times t \text{ dan } 450 \text{ mm} \\
 &= 2 \times 135 \\
 &= 270 \text{ mm} \\
 \text{Cek Spasi Maksimum} &= s \leq s_{max} \\
 &= 200 \leq 270 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, } n &= \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} \text{ [Analisis untuk per 1 m]} \\
 &= \frac{1000}{200} \\
 &= 5 \\
 d_b &= 10 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

| | |
|--|---|
| Jarak Bersih Antar Tulangan | $= s - d_b$ $= 200 - 10$ $= 190 \text{ mm}$ |
| Cek Jarak Bersih | $= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}$ $= 190 \geq 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}$ |
| Jumlah Lapis | $= 2$ |
| A_s Pasang | $= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$ $= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2$ $= 392,699 \text{ mm}^2$ |
| A_s min ($f_y < 420 \text{ MPa}$) | $= 0,2\% \times b \times t$ $= 0,2\% \times 1000 \times 135$ $= 270 \text{ mm}^2$ |
| A_s min ($f_y \geq 420 \text{ MPa}$) | $= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times t \text{ dan } 0,14\% \times b$ $\times t$ $= (0,18\% \times \frac{420}{420}) \times 1000 \times 135 \text{ dan}$ $0,14\% \times 1000 \times 135$ $= 243 \text{ mm}^2$ |
| Cek A_s min | $= A_s \text{ Pasang} \geq A_s \text{ min}$ $= 392,699 \geq 243 \text{ MPa} \rightarrow \quad \mathbf{OK}$ |
| Tinggi Blok Beton, a | $= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b}$ $= 392,699 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000}$ $= 7,762 \text{ mm}$ |
| Kapasitas Lentur, M_n | $= A_s \times f_y \times (d - \frac{a}{2})$ $= 392,699 \times 420 \times (95,5 - \frac{13,117}{2})$ $= 15,853 \text{ kNm}$ |
| Lokasi Garis Netral, c | $= \frac{a}{\beta_1}$ $= \frac{7,762}{0,85}$ $= 9,131 \text{ mm}$ |
| Regangan Tulangan Tarik, ϵ_s | $= \frac{(d - c)}{c} \times 0.003$ |

$$= \frac{(95,5 - 9,131)}{9,131} \times 0,003$$

$$= 0,030$$

Faktor Reduksi, ϕ $= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9$

$$= 0,9$$

Kapasitas Lentur Tereduksi, ϕM_n $= \phi \times M_n$

$$= 0,9 \times 15,853$$

$$= 14,268 \text{ kNm}$$

Momen Ultimit, M_u $= 9,794 \text{ kNm}$

Cek Kapasitas $= \phi M_n > M_u$

$$= 14,268 > 9,794 \text{ kNm} \rightarrow \text{OK}$$

c) Momen Positif M11 (Tulangan Lapangan Bawah Arah Sumbu 2 (Y))

Spasi Tulangan, s $= 200$

Spasi Maksimum, s_{max} $= 2 \times t \text{ dan } 450 \text{ mm}$

$$= 2 \times 135$$

$$= 270 \text{ mm}$$

Cek Spasi Maksimum $= s \leq s_{max}$

$$= 200 \leq 270 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, $n = \frac{b}{s} = \frac{1000}{s}$ [Analisis untuk per 1 m]

$$= \frac{1000}{200}$$

$$= 5$$

d_b $= 10 \text{ mm}$

Jarak Bersih Antar Tulangan $= s - d_b$

$$= 200 - 10$$

$$= 190 \text{ mm}$$

Cek Jarak Bersih $= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}$

$$= 187 \geq 25 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

A_s Pasang $= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$

$$= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 392,699 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ min } (f_y < 420 \text{ MPa}) &= 0,2\% \times b \times t \\
 &= 0,2\% \times 1000 \times 135 \\
 &= 270 \text{ mm}^2 \\
 A_s \text{ min } (f_y \geq 420 \text{ MPa}) &= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times t \text{ dan } 0,14\% \times b \\
 \times t &= (0,18\% \times \frac{420}{420}) \times 1000 \times 135 \text{ dan} \\
 0,14\% \times 1000 \times 135 &= 243 \text{ mm}^2 \\
 \text{Cek } A_s \text{ min} &= A_s \text{ Pasang} \geq A_s \text{ min} \\
 &= 392,699 \geq 243 \text{ MPa} \rightarrow \quad \mathbf{OK} \\
 \text{Tinggi Blok Beton, } a &= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \\
 &= 392,699 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000} \\
 &= 7,762 \text{ mm} \\
 \text{Kapasitas Lentur, } M_n &= A_s \times f_y \times (d - d_b - \frac{a}{2}) \\
 &= 392,699 \times 420 \times (95,5 - 13 - \frac{7,762}{2}) \\
 &= 14,204 \text{ kNm} \\
 \text{Lokasi Garis Netral, } c &= \frac{a}{\beta_1} \\
 &= \frac{7,762}{2} \\
 &= 9,131 \text{ mm} \\
 \text{Regangan Tulangan Tarik, } \epsilon_s &= \frac{(d - c)}{c} \times 0.003 \\
 &= \frac{(95,5 - 9,131)}{9,131} \times 0.003 \\
 &= 0,030 \\
 \text{Faktor Reduksi, } \phi &= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\epsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9 \\
 &= 0,9 \\
 \text{Kapasitas Lentur Tereduksi, } \phi M_n &= \phi \times M_n \\
 &= 0,9 \times 14,204 \\
 &= 12,784 \text{ kNm} \\
 \text{Momen Ultimit, } M_u &= 7,571 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Kapasitas} &= \phi M_n > M_u \\ &= 12,784 > 7,571 \text{ kNm} \rightarrow \mathbf{OK} \end{aligned}$$

d) Momen Negatif M11 (Tulangan Tumpuan Atas Arah Sumbu 2 (Y))

$$\begin{aligned} \text{Spasi Tulangan, } s &= 150 \text{ mm} \\ \text{Spasi Maksimum, } s_{max} &= 2 \times t \text{ dan } 450 \text{ mm} \\ &= 2 \times 135 \\ &= 270 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Spasi Maksimum} &= s \leq s_{max} \\ &= 200 \leq 270 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, } n &= \frac{b}{s} = \frac{1000}{s} \text{ [Analisis untuk per 1 m]} \\ &= \frac{1000}{150} \\ &= 7 \end{aligned}$$

$$d_b = 10 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak Bersih Antar Tulangan} &= s - d_b \\ &= 200 - 10 \\ &= 190 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cek Jarak Bersih} &= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm} \\ &= 187 \geq 25 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ Pasang} &= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2 \\ &= 7 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2 \\ &= 523,599 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ min } (f_y < 420 \text{ MPa}) &= 0,2\% \times b \times t \\ &= 0,2\% \times 1000 \times 135 \\ &= 270 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_s \text{ min } (f_y \geq 420 \text{ MPa}) &= \left(0,18\% \times \frac{420}{f_y}\right) \times b \times t \text{ dan } 0,14\% \times b \\ \times t &= \left(0,18\% \times \frac{420}{420}\right) \times 1000 \times 135 \text{ dan} \\ 0,14\% \times 1000 \times 135 &= 243 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Cek } A_s \text{ min} = A_s \text{ Pasang} \geq A_s \text{ min}$$

$$= 523,599 \geq 243 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Tinggi Blok Beton, a

$$= A_s \times \frac{f_y}{0,85 \times f'_c \times b}$$

$$= 523,599 \times \frac{420}{0,85 \times 25 \times 1000}$$

$$= 10,349 \text{ mm}$$

Kapasitas Lentur, M_n

$$= A_s \times f_y \times \left(d - d_b - \frac{a}{2}\right)$$

$$= 523,599 \times 420 \times \left(95,5 - 13 - \frac{10,349}{2}\right)$$

$$= 18,654 \text{ kNm}$$

Lokasi Garis Netral, c

$$= \frac{a}{\beta_1}$$

$$= \frac{10,349}{0,85}$$

$$= 12,175 \text{ mm}$$

Regangan Tulangan Tarik, ε_s

$$= \frac{(d - c)}{c} \times 0,003$$

$$= \frac{(95,5 - 12,175)}{12,175} \times 0,003$$

$$= 0,022$$

Faktor Reduksi, ϕ

$$= 0,65 \leq 0,65 + \frac{\varepsilon_s - 0,002}{0,003} \times 0,25 \leq 0,9$$

$$= 0,9$$

Kapasitas Lentur Tereduksi, ϕM_n

$$= \phi \times M_n$$

$$= 0,9 \times 18,654$$

$$= 16,789 \text{ kNm}$$

Momen Ultimit, M_u

$$= 15,772 \text{ kNm}$$

Cek Kapasitas

$$= \phi M_n > M_u$$

$$= 16,789 > 15,772 \text{ kNm} \rightarrow \text{OK}$$

e) Tulangan Minimum (Untuk Tumpuan Bawah dan Lapangan Atas, arah X dan Y)

Spasi Tulangan, s

$$= 200 \text{ mm}$$

Spasi Maksimum, s_{max}

$$= 2 \times t \text{ dan } 450 \text{ mm}$$

$$= 2 \times 135$$

$$= 270 \text{ mm}$$

| | |
|--|--|
| Cek Spasi Maksimum | $= s \leq s_{max}$ |
| | = OK |
| Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, n | $= \frac{b}{s} = \frac{1000}{s}$ [Analisis untuk per 1 m] |
| | $= \frac{1000}{200}$ |
| | $= 5$ |
| d_b | $= 10 \text{ mm}$ |
| Jarak Bersih Antar Tulangan | $= s - d_b$ |
| | $= 200 - 10$ |
| | $= 190 \text{ mm}$ |
| Cek Jarak Bersih | $= \text{Jarak Bersih} \geq d_b \text{ dan } 25 \text{ mm}$ |
| | $= 190 \geq 25 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{OK}$ |
| Jumlah Lapis | $= 2$ |
| A_s Pasang | $= n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$ |
| | $= 5 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2$ |
| | $= 392,699 \text{ mm}^2$ |
| A_s min ($f_y < 420 \text{ MPa}$) | $= 0,2\% \times b \times t$ |
| | $= 0,2\% \times 1000 \times 135$ |
| | $= 270 \text{ mm}^2$ |
| A_s min ($f_y \geq 420 \text{ MPa}$) | $= (0,18\% \times \frac{420}{f_y}) \times b \times t \text{ dan } 0,14\% \times b$ |
| x t | $= 0,18\% \times \frac{420}{420} \times 1000 \times 135 \text{ dan}$ |
| | $0,14\% \times 1000 \times 135$ |
| | $= 243 \text{ mm}^2$ |
| Cek A_s min | $= A_s \text{ Pasang} \geq A_s \text{ min}$ |
| | $= 392,699 \geq 243 \text{ mm}^2 \rightarrow \mathbf{OK}$ |

Berdasarkan hasil perhitungan dan perencanaan tulangan pelat yang telah dilakukan, selanjutnya disusun rekapitulasi untuk mempermudah dalam mengevaluasi kebutuhan tulangan pada setiap arah dan kondisi pembebanan. Rekapitulasi ini memuat informasi mengenai jumlah dan jenis tulangan yang digunakan, baik pada arah memanjang maupun melintang, serta perbandingannya

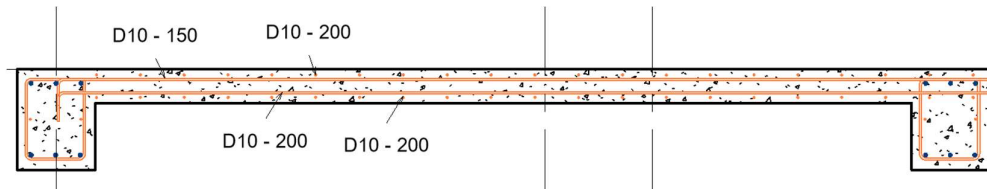
terhadap kebutuhan tulangan minimum yang disyaratkan. Dengan adanya tabel rekapitulasi ini, dapat diketahui bahwa perencanaan tulangan pelat telah memenuhi ketentuan yang berlaku serta mampu menahan beban yang bekerja secara aman. Adapun hasil rekapitulasi perhitungan tulangan pelat disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 49 Rekapitulasi Perhitungan Tulangan Pelat

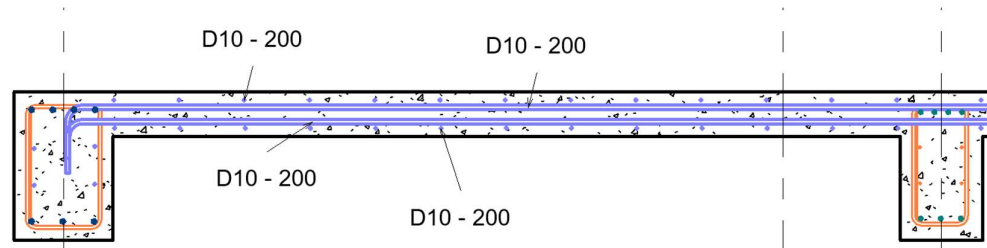
| Tipe Pelat | Tulangan | | | | ϕM_n | | | | Mu | | | |
|-------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | Tul Bawah (X) | Tul. Atas (X) | Tul. Bawah (Y) | Tul. Atas (Y) | Tul Bawah (X) | Tul. Atas (X) | Tul. Bawah (Y) | Tul. Atas (Y) | Tul Bawah (X) | Tul. Atas (X) | Tul. Bawah (Y) | Tul. Atas (Y) |
| S1 (135 mm) | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | D10 – 250 mm | 12,041 | 12,041 | 10,557 | 10,557 | 0,943 | 4,744 | 0,962 | 0,679 |
| S2 (150 mm) | D10 – 200 mm | D10 – 150 mm | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | 16,495 | 21,737 | 15,010 | 15,010 | 11,441 | 21,540 | 14,381 | 13,747 |
| S3 (120 mm) | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | D10 – 200 mm | 12,041 | 12,041 | 10,557 | 10,557 | 0,943 | 4,744 | 0,962 | 0,679 |

Tabel 4. 50 Rekap Penulangan Pelat

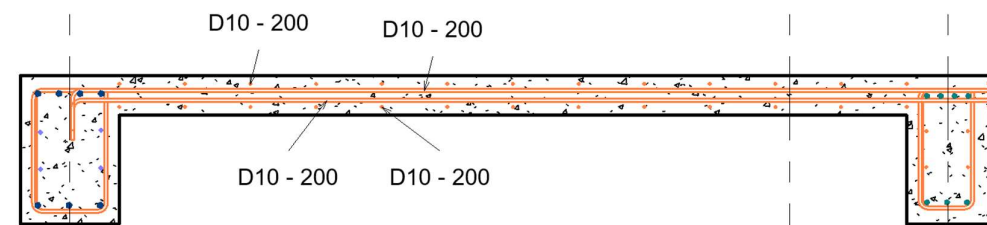
| Tipe Pelat | Tebal (mm) | Selimit Beton (mm) | | Arah X | Arah Y |
|------------|------------|--------------------|----------------|-----------|-----------|
| S1 | 135 | 20 | Tulangan Atas | D10 – 200 | D10 – 250 |
| | | | Tulangan Bawah | D10 – 200 | D10 – 200 |
| S2 | 150 | 20 | Tulangan Atas | D10 – 150 | D10 – 200 |
| | | | Tulangan Bawah | D10 – 200 | D10 – 200 |
| S3 | 120 | 20 | Tulangan Atas | D10 – 200 | D10 – 200 |
| | | | Tulangan Bawah | D10 – 200 | D10 – 200 |



Gambar 4. 7 Potongan Pelat S1



Gambar 4. 8 Potongan Pelat S2



Gambar 4. 9 Potongan Pelat S3

4.7 Perhitungan Struktur Bawah

4.7.1 Perencanaan Pondasi *Bored pile*

1. Properti Material dan Penampang

| | |
|-------------------|---|
| Jenis Pondasi | = P1 |
| Diameter Pondasi | = 500 mm |
| Kedalaman Pondasi | = 18000 mm |
| Tebal Selimut | = 75 mm |
| Mutu Beton | = 30 MPa |
| E_c | = $4700 \times \sqrt{f'_c}$ = 25742,96 |
| Tegangan Leleh | = 420 MPa |
| E_s | = 200000 MPa |

2. Menentukan Kuat Izin *Bored Pile* Berdasarkan Kekuatan Material Tiang

$$\begin{aligned}\sigma \text{ Bahan} &= 0,25 \times f'_c \\ &= 0,25 \times 25 \\ &= 76,4776 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A \text{ Tiang} &= \frac{1}{4} \times \pi \times Q^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 50^2 \\ &= 1964,2857 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P \text{ Tiang} &= \sigma \text{ Bahan} \times A \text{ Tiang} \\ &= 76,4776 \times 1964,286 \\ &= 150223,66 \text{ kg} \\ &= 150,224 \text{ ton}\end{aligned}$$

3. Menentukan Kuat Izin *Bored Pile* Berdasarkan Kekuatan Tanah

Tabel 4. 51 Hasil N-SPT SMK Negeri 15 Jakarta

| No | Jarak | Kedalaman (di) | BH-01 | di/BH-1 |
|-------------|-------|----------------|-------|---------|
| 1 | 2 | 2 | 4 | 0,500 |
| 2 | 4 | 2 | 4 | 0,500 |
| 3 | 6,0 | 2 | 7 | 0,286 |
| 4 | 8,0 | 2 | 5 | 0,400 |
| 5 | 10,0 | 2 | 16,5 | 0,121 |
| 6 | 12,0 | 2 | 28,5 | 0,070 |
| 7 | 14,0 | 2 | 17,5 | 0,114 |
| 8 | 16,0 | 2 | 35 | 0,057 |
| 9 | 18,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 10 | 20,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 11 | 22,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| 12 | 24,0 | 2 | 34,5 | 0,058 |
| 13 | 26,0 | 2 | 21 | 0,095 |
| 14 | 28,0 | 2 | 19 | 0,105 |
| 15 | 30,0 | 2 | 37,5 | 0,053 |
| | | 30 | | 2,520 |
| N rata-rata | | | | 11,903 |

$$\begin{aligned}\text{Nilai N-SPT di atas ujung tiang} &= 8D \\ &= 8 \times 50 \\ &= 400 \text{ cm} \\ &= 4 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai N-SPT di bawah ujung tiang} &= 4D \\
 &= 4 \times 50 \\
 &= 200 \text{ cm} \\
 &= 2 \text{ m} \\
 \text{NP (rata rata disekitar ujung tiang)} &= \frac{17,5+35}{3} \cdot 5 \\
 &= 30 \\
 A_p &= \frac{1}{4} \times \pi \times Q^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 1,64^2 \\
 &= 2,113 \text{ ft}^2 \\
 Q_p \text{ tiang} &= 4 \times A_p \text{ tiang} \times N_p \\
 &= 4 \times 2,113 \times 30 \\
 &= 253,591 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

4. Menentukan Tahanan Selimut *Bored Pile*

$$\begin{aligned}
 \text{N (rata rata di sepanjang tiang)} &= 17,2 \\
 \text{L (Kedalaman tiang)} &= 1800 \text{ cm} \\
 A_s \text{ tiang} &= \pi \times \phi \times L \\
 &= \pi \times 1,64 \times 59,04 \\
 &= 304,309 \text{ ft}^2 \\
 Q_s \text{ tiang} &= A_s \text{ tiang} \times \text{N rata rata} \\
 &= 304,309 \times 17,2 \\
 &= 104,682 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

5. Menghitung Daya Dukung *Ultimate* dan *Allowable* Tiang

$$\begin{aligned}
 Q_u \text{ tiang} &= Q_p \text{ tiang} + Q_s \text{ tiang} \\
 &= 253,591 + 104,682 \\
 &= 358,273 \text{ ton} \\
 Q_{all} &= \frac{Q_u \text{ tiang}}{SF} \\
 &= \frac{358,273}{4} \\
 &= 89,568 \text{ ton} \\
 \text{Berat Sendiri Tiang} &= A \times L \times \text{Massa jenis}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1964,286 \times 1800 \times 0,0024 \\
 &= 8485,7143 \text{ kg} \\
 &= 8,486 \text{ ton} \\
 Q_{netto} &= Q_{all} - \text{Berat sendiri tiang} \\
 &= 89,568 - 8,486 \\
 &= 81,083 \text{ ton} \\
 \text{Syarat} &= P_{tiang} > Q_{netto} \\
 &= 150,224 > 81,0826 \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

6. Menentukan Jumlah Kebutuhan *Bored Pile*

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya Aksial Kolom (p)} &= 2379,18 \text{ KN} \\
 &= 242,527 \text{ ton} \\
 n \text{ tiang} &= \frac{P_{max}}{Q_{netto}} \\
 &= \frac{242,527}{81,083} \\
 &= 2,991 \\
 &= 4 \text{ buah tiang}
 \end{aligned}$$

7. Menentukan Efisiensi Kelompok Tiang

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak Antar Tiang (s)} &= 2,5D - 4D \\
 &= 2,5(50) - 4(50) \\
 &= 1250 - 2000 \\
 S \text{ Pakai} &= 1300 \text{ mm} \\
 \text{Jarak Tiang ke Tepi (s')} &= 1,25D - 2D \\
 &= 1,25(50) - 2(50) \\
 &= 625 - 1000 \\
 S' \text{ Pakai} &= 700 \text{ mm} \\
 \theta &= \arctan \frac{D}{S} \\
 &= \arctan \frac{500}{1300} \\
 &= 21,038 \\
 \text{Jumlah Baris Tiang (m)} &= 2 \text{ baris} \\
 \text{Jumlah Tiang Tiap Baris (n)} &= 2 \text{ baris}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_g &= 1 - \frac{\theta}{90} \times \left(\frac{(n-1)m + (m-1)m}{mn} \right) \\
 &= 1 - \frac{21,038}{90} \times \left(\frac{(2-1)2 + (2-1)2}{2 \times 2} \right) \\
 &= 0,766 \\
 &= 76,62\%
 \end{aligned}$$

8. Analisa Daya Dukung Kelompok Tiang

$$\begin{aligned}
 Q_{tk} &= E_g \times n \text{ tiang} \times Q_{netto} \\
 &= 0,766 \times 4 \times 81,083 \\
 &= 248,518 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Syarat} &= Q_{tk} > \text{Gaya aksial bangunan} \\
 &= 248,518 > 242,527 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

→ **OK**9. Desain Penulangan *Bored Pile*

$$\text{Tulangan Utama} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Tulangan Sengkang} = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Selimut Beton} = 75 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal Efektif Tiang} = 407 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah Tiang} = 6 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned}
 A_s \text{ tul. total} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \phi^2 \times n \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 16^2 \times 6 \\
 &= 1206,86 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_s \text{ tiang} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \phi^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 500^2 \\
 &= 196429 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{A_s \text{ tul. total}}{A_s \text{ tiang}} \\
 &= \frac{1206,86}{196429} \\
 &= 0,0061
 \end{aligned}$$

$$p \text{ min} = \frac{A_s \text{ tul. total}}{A_s \text{ tiang}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1,4}{f_y} \\
 &= 0,0033 \\
 \text{p pakai} &= 0,0061 \\
 \text{Syarat} &= \text{p pakai} \geq \text{p min} \\
 &= 0,0061 \geq 0,0033 \quad \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Panjang Sendi Plastis} &= 7D \\
 &= 7(500) \\
 &= 3500 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{s Pakai di Dalam Sendi Plastis} &= s \leq \min \left(\frac{1}{4} D, 6d_b, 100 \right) \\
 &= s \leq \min \left(\frac{1}{4} (500), 6(16), 100 \right) \\
 &= 100 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{s Pakai di Luar Sendi Plastis} &= s \leq \min \left(\frac{1}{2} D, 16d_b, 300 \right) \\
 &= s \leq \min \left(\frac{1}{2} (500), 16(16), 100 \right) \\
 &= 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

10. Kapasitas Struktur Tiang

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Beton, } A_g &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 500^2 \\
 &= 196429 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Tulangan, } A_s &= \text{Jmlh Tulangan} \times \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \\
 &= 6 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 16^2 \\
 &= 1206,86 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Beton Efektif, } A_c &= A_g - A_s \\
 &= 196429 - 1206,86 \\
 &= 195222 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas Nominal, } P_u &= 0,85 \times f'_c \times A_c + f_y \times A_s \\
 &= 0,85 \times 30 \times 195222 + 420 \times 1206,86 \\
 &= 5485034 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\text{Faktor Reduksi, } \phi P_n = \phi \times P_n$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,65 \times 5485034 \\
 &= 3565373 \text{ N} \\
 &= 363,4324 \text{ ton} \\
 \text{Syarat} &= \phi P_n > P_u \\
 &= 363,432 > 242,527 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

→ **OK**

4.7.2 Perencanaan *Pile cap*

1. Analisa Gaya Geser 1 Arah *Pile cap* Arah y

| | |
|-----------------------|---|
| Jenis <i>Pile cap</i> | = PC1 |
| Panjang (x) | = 3000 mm |
| Lebar (y) | = 3000 mm |
| Tebal (t) | = 700 mm |
| Tulangan Utama | = 19 mm |
| h/b Kolom | = 650 mm |
| Selimut | = 75 mm |
| Mutu Beton, f'_c | = 25 MPa |
| β_c | $= \frac{L_x}{L_y}$ $= \frac{3000}{3000}$ $= 1$ |
| λ | = 1 (beton normal) |
| α_s | = 40 |
| s (jarak tiang) | = 150 cm |
| P_u | = 2344,0415 KN |
| Jumlah Tiang | = 4 buah |
| f_y | = 420 MPa |
| σ | $= \frac{P}{A}$ $= \frac{2344,0415}{3 \times 3}$ $= 260,449 \text{ KN/m}^2$ |

$$\begin{aligned}
 G' &= \text{Panjang} - \left(\frac{\text{Panjang}}{2} + \frac{h \text{ Kolom}}{2} \right) + d \\
 &= 3000 - \left(\frac{3000}{2} + \frac{325}{2} \right) + 606 \\
 &= 569 \text{ mm} \\
 &= 0,569 \text{ m} \\
 V_u &= \sigma \times L \times G' \\
 &= 260,449 \times 3 \times 0,569 \\
 &= 444,587 \text{ KN} \\
 \phi V_c &= 0,75 \times \frac{f'_c}{6} \times L \times d \\
 &= 0,75 \times \frac{25}{6} \times 3000 \times 606 \\
 &= 1136250 \text{ N} \\
 &= 1136,25 \text{ KN} \\
 \text{Syarat} &= \phi V_c > V_u \\
 &= 1136 > 444,587 \text{ KN} \rightarrow \quad \mathbf{OK}
 \end{aligned}$$

2. Analisa Gaya Geser 1 Arah *Pile cap* Arah y

$$\begin{aligned}
 \text{Jenis } Pile \text{ cap} &= \text{PC1} \\
 \text{Panjang (x)} &= 3000 \text{ mm} \\
 \text{Lebar (y)} &= 3000 \text{ mm} \\
 \text{Tebal (t)} &= 700 \text{ mm} \\
 \text{Tulangan Utama} &= 19 \text{ mm} \\
 \text{h/b Kolom} &= 650 \text{ mm} \\
 \text{Selimut} &= 75 \text{ mm} \\
 \text{Mutu Beton, } f'_c &= 25 \text{ MPa} \\
 \beta_c &= \frac{L_x}{L_y} \\
 &= \frac{3000}{3000} \\
 &= 1 \\
 \lambda &= 1 \text{ (beton normal)} \\
 \alpha_s &= 40 \\
 s \text{ (jarak tiang)} &= 150 \text{ cm} \\
 P_u &= 2344,0415 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Tiang} &= 4 \text{ buah} \\
 f_y &= 420 \text{ MPa} \\
 \sigma &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{2344,0415}{3 \times 3} \\
 &= 260,449 \text{ KN/m}^2 \\
 G' &= \text{Panjang} - \left(\frac{\text{Panjang}}{2} + \frac{h \text{ Kolom}}{2} \right) + d \\
 &= 3000 - \left(\frac{3000}{2} + \frac{325}{2} \right) + 606 \\
 &= 569 \text{ mm} \\
 &= 0,569 \text{ m} \\
 V_u &= \sigma \times L \times G' \\
 &= 260,449 \times 3 \times 0,569 \\
 &= 444,587 \text{ KN} \\
 \phi V_c &= 0,75 \times \frac{f'_c}{6} \times L \times d \\
 &= 0,75 \times \frac{25}{6} \times 3000 \times 606 \\
 &= 1136250 \text{ N} \\
 &= 1136,25 \text{ KN} \\
 \text{Syarat} &= \phi V_c > V_u \\
 &= 1136,25 > 444,587 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

→ **OK**3. Analisa Daerah Gaya Geser Dua Arah *Pile cap*

$$\begin{aligned}
 B' &= b \text{ kolom} + \frac{d}{2} \times 2 \\
 &= 650 + \frac{606}{2} \times 2 \\
 &= 1256 \text{ mm} \\
 &= 1,256 \text{ m} \\
 B' \text{ sisi lain) } &= L' \text{ (Panjang daerah keliling kritis)} \\
 &= 1,256 \text{ m} \\
 b_0 &= 2(B' + L')
 \end{aligned}$$

$$= 2(1,256 + 1,256)$$

$$= 5,024 \text{ m}$$

$$= 5024 \text{ mm}$$

4. Nilai Kuat Geser Dua Arah

$$V_{c1} = 0,17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \times d'$$

$$= 7763,587 \text{ KN}$$

$$V_{c2} = 0,083 \times \left(\frac{a_s \times d'}{b_0}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \times d'$$

$$= 8623,089 \text{ KN}$$

$$V_{c3} = 0,33 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_0 \times d'$$

$$= 5023,498 \text{ KN}$$

$$V_c \text{ pakai} = 5023,498 \text{ KN}$$

$$\phi V_c = 0,75 \times V_c$$

$$= 0,75 \times 5023,498$$

$$= 3767,6232 \text{ KN}$$

5. Tegangan Yang Terjadi Pada Tanah

$$V_u = \sigma (1 \times b - L' \times B')$$

$$= 260,449 \times (3 \times 3 - 1,256 \times 1,256)$$

$$= 1933,174 \text{ KN}$$

$$\text{Syarat} = \phi V_c > V_u$$

$$= 3767,6232 > 1933,174 \text{ KN}$$

→ **OK**

6. Perhitungan Penulangan *Pile cap*

$$B = \frac{\text{Lebar Pilecap}}{2} - \frac{\text{Lebar Kolom}}{2}$$

$$= \frac{3}{2} - \frac{0,65}{2}$$

$$= 1,175 \text{ m}$$

Berat *Pile cap* Pada Penampang Kritis

$$q' = \gamma \times d \times t$$

$$= 2400 \times 3 \times 0,7$$

$$= 5040 \text{ kg/m}$$

$$M_u = 2\left(\frac{P_u}{n_s} \times s\right) - 0,5 \times q' \times B^2$$

$$= 1723,9004 \text{ kNm}$$

$$R_n \text{ arah x} = \frac{M_u}{\Phi \times b \times d^2}$$

$$= \frac{1723900418}{0,9 \times 3000 \times 606^2}$$

$$= 1,738 \text{ N/mm}^2$$

$$P \text{ perlu} = \frac{0,85 \times f'_c}{f_y} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{0,85 \times f'_c}}\right)$$

$$= 0,0043244$$

$$A_s \text{ perlu arah x} = p \text{ perlu} \times b \times d$$

$$= 0,0043244 \times 3000 \times 606$$

$$= 7861,6824 \text{ mm}^2$$

Tulangan Bawah Arah x

$$D = 19 \text{ mm}$$

$$S = 100 \text{ mm}$$

$$A_s \text{ pakai} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \frac{b}{s}$$

$$= \frac{1}{4} \times \pi \times 19^2 \times \frac{3000}{100}$$

$$= 8509,286 \text{ mm}^2$$

$$\text{Syarat} = A_s \text{ pakai} > A_s \text{ perlu}$$

$$= 8509,286 > 7861,6824 \text{ mm}^2$$

→ **OK**

Tulangan Atas Arah x

$$A_s \text{ perlu} = 20\% \times A_s \text{ pakai tulangan bawah}$$

$$= 20\% \times 8509,2857$$

$$= 1701,857 \text{ mm}^2$$

$$D = 19 \text{ mm}$$

$$S = 200 \text{ mm}$$

$$A_s \text{ pakai} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \frac{b}{s}$$

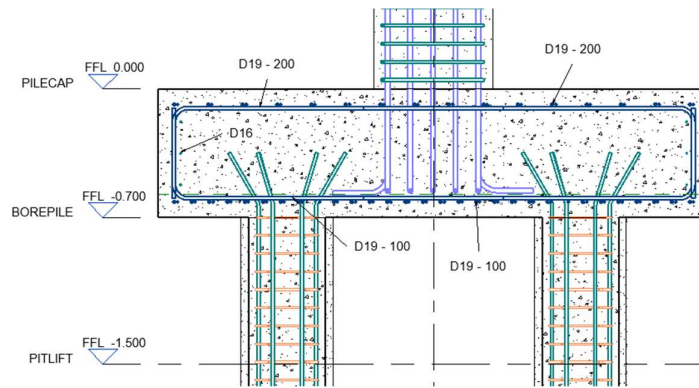
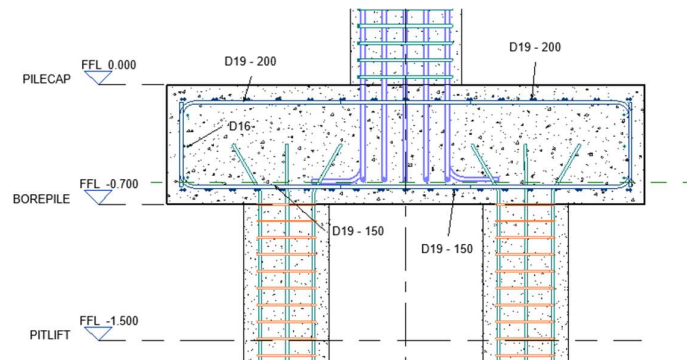
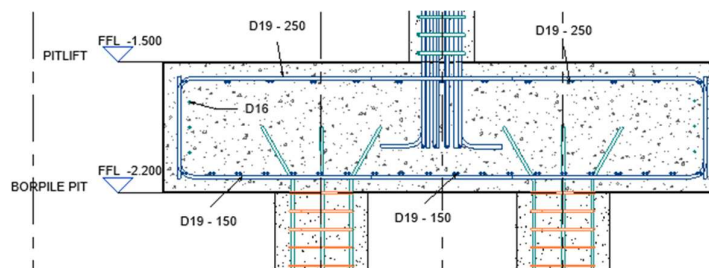
$$= \frac{1}{4} \times \pi \times 19^2 \times \frac{3000}{200}$$

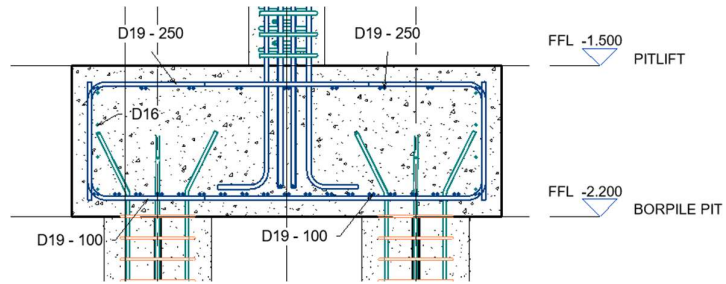
$$\begin{aligned}
 &= 4254,6429 \text{ mm}^2 \\
 \text{Syarat} &= A_s \text{ pakai} > A_s \text{ perlu} \\
 &= 4254,64 > 1701,857 \text{ mm}^2 \\
 &\rightarrow \text{OK} \\
 R_n \text{ arah y} &= \frac{M_u}{\Phi \times b \times d^2} \\
 &= \frac{1723900418}{0,9 \times 3000 \times 606^2} \\
 &= 1,7386 \text{ N/mm}^2 \\
 P \text{ perlu} &= \frac{0,85 \times f'_c}{f_y} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{0,85 \times f'_c}}\right) \\
 &= 0,004324 \\
 A_s \text{ perlu arah y} &= p \text{ perlu} \times b \times d \\
 &= 0,004324 \times 3000 \times 606 \\
 &= 7861,6823 \text{ mm}^2 \\
 \text{Tulangan Bawah Arah y} & \\
 D &= 19 \text{ mm} \\
 S &= 100 \text{ mm} \\
 A_s \text{ pakai} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \frac{b}{s} \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 19^2 \times \frac{3000}{100} \\
 &= 8509,29 \text{ mm}^2 \\
 \text{Syarat} &= A_s \text{ pakai} > A_s \text{ perlu} \\
 &= 8509,29 > 7861,68 \text{ mm}^2 \\
 &\rightarrow \text{OK} \\
 \text{Tulangan Atas Arah y} & \\
 A_s \text{ perlu} &= 20\% \times A_s \text{ pakai tulangan bawah} \\
 &= 20\% \times 8509,29 \\
 &= 1701,86 \text{ mm}^2 \\
 D &= 19 \text{ mm} \\
 S &= 200 \text{ mm} \\
 A_s \text{ pakai} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \frac{b}{s}
 \end{aligned}$$

Syarat

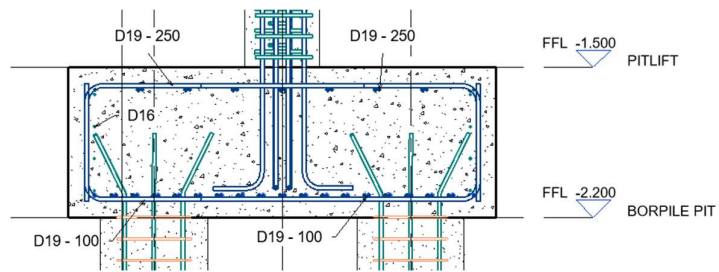
$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 19^2 \times \frac{3000}{200} \\
 &= 4254,64 \text{ mm}^2 \\
 &= A_s \text{ pakai} > A_s \text{ perlu} \\
 &= 4254,64 > 1701,86 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

→ OK

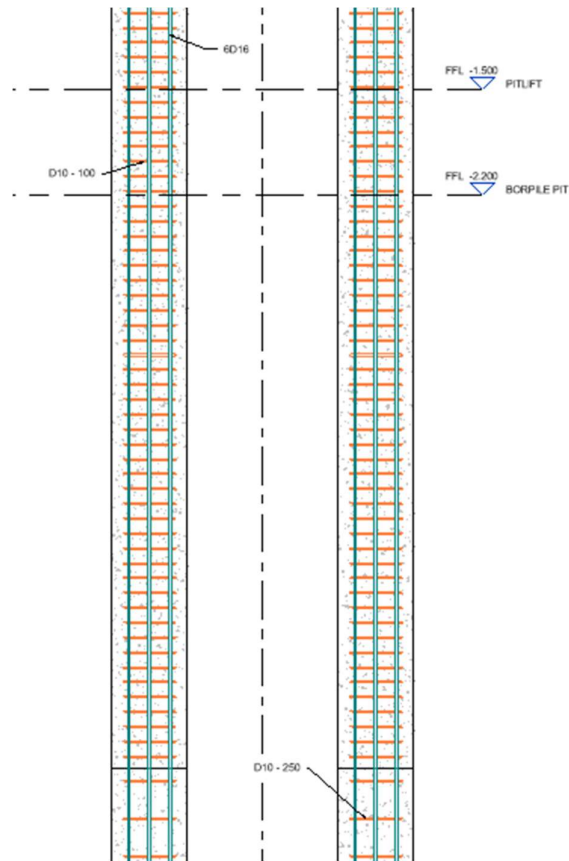
Gambar 4. 10 Potongan *Pile Cap* PC1Gambar 4. 11 Potongan *Pile Cap* PC2Gambar 4. 12 Potongan *Pile Cap* PC3



Gambar 4. 13 Potongan *Pile Cap* PC4



Gambar 4. 14 Potongan *Pile Cap* PC5



Gambar 4. 15 Potongan Pondasi *Bored Pile*

Berdasarkan hasil perhitungan perencanaan pondasi yang meliputi *bored pile* dan *pile cap*, selanjutnya disusun rekapitulasi untuk mempermudah dalam mengevaluasi kebutuhan tulangan, dimensi, serta kapasitas elemen pondasi terhadap beban yang bekerja. Rekapitulasi ini memuat informasi mengenai lokasi *bored pile*, diameter dan jumlah tiang, gaya aksial yang diterima, serta dimensi dan kebutuhan tulangan *pile cap*. Dengan adanya tabel rekapitulasi ini, dapat diketahui bahwa perencanaan pondasi telah memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Adapun hasil rekapitulasi perhitungan *bored pile* dan *pile cap* disajikan pada **Tabel 4.52** dan **Tabel 4.53**.

Tabel 4. 52 Rekapitulasi Perhitungan Tulangan *Bored Pile*

| Lokasi Borpile | Dimaeter | Jumlah Tiang | Qtk | Gaya Aksial Bangunan |
|-----------------------|-----------------|---------------------|------------|-----------------------------|
| PC1 | 500 | 4 | 257,89 | 238,944 |
| PC2 | 500 | 4 | 245,765 | 174,075 |
| PC3 | 500 | 2 | 143,212 | 83,203 |
| PC4 | 500 | 2 | 142,524 | 99,001 |
| PC5 | 500 | 2 | 142,523 | 66,354 |

Tabel 4. 53 Rekapitulasi Perhitungan Tulangan *Pile cap*

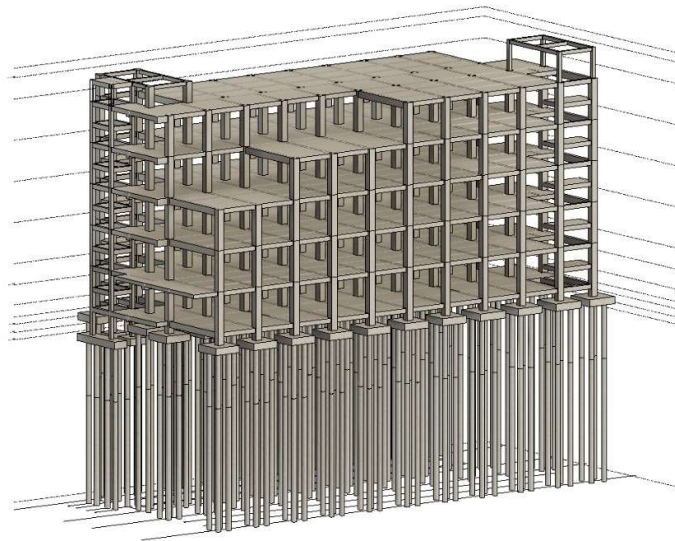
| Tipe <i>Pile cap</i> | Ukuran | Tulangan | | | | As Perlu | | | | As Pakai | | | |
|----------------------|-------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | Tul. Atas (x) | Tul. Bawah (x) | Tul. Atas (Y) | Tul. Bawah (Y) | Tul. Atas (x) | Tul. Bawah (x) | Tul. Atas (Y) | Tul. Bawah (Y) | Tul. Atas (x) | Tul. Bawah (x) | Tul. Atas (Y) | Tul. Bawah (Y) |
| PC1 | 3000 x 3000 x 700 | D19 – 200 | D19 – 100 | D19 – 200 | D19 – 100 | 1701,857 | 7861,682 | 1701,857 | 7861,682 | 4254,643 | 8509,286 | 4254,643 | 8509,286 |
| PC2 | 2800 x 2800 x 700 | D19 – 250 | D19 – 150 | D19 – 200 | D19 – 150 | 3971 | 4669,92 | 1058,93 | 5294,66 | 1058,93333 | 5294,667 | 3971 | 4669,928 |
| PC3 | 3000 x 1500 x 700 | D19 – 250 | D19 – 150 | D19 – 250 | D19 – 150 | 1134,571 | 4717,491 | 567,28 | 2358,74 | 3403,71 | 5672,85 | 1701,85 | 2836,42 |
| PC4 | 2000 x 2000 x 700 | D19 – 250 | D19 – 100 | D19 – 250 | D19 – 100 | 1134,571 | 5497,169 | 1134,57 | 5497,17 | 2269,143 | 5672,85 | 5672,8 | 2269,14 |
| PC5 | 1400 x 2000 x 700 | D19 – 250 | D19 – 100 | D19 – 250 | D19 – 100 | 794,2 | 3675,126 | 1134,57 | 5250,18 | 1588,4 | 3971 | 2269,14 | 5672,85 |

Tabel 4. 54 Rekap Penulangan *Pile cap*

| Dimensi (mm) | | Tulangan Bawah | Tulangan Atas | Tulangan Samping |
|----------------------|--------|----------------|---------------|------------------|
| PC1 (3000 x 3000) | Arah X | D19 – 100 mm | D19 – 200 mm | D16 – 150 |
| | Arah Y | D19 – 100 mm | D19 – 200 mm | |
| PC2 (2800 x 2800) | Arah X | D19 – 150 mm | D19 – 200 mm | D16 – 150 |
| | Arah Y | D19 – 150 mm | D19 – 200 mm | |
| PC3 (3000 x 1500) | Arah X | D19 – 150 mm | D19 – 250 mm | D16 – 150 |
| | Arah Y | D19 – 150 mm | D19 – 250 mm | |
| PC4 (2000 x 2000) | Arah X | D19 – 100 mm | D19 – 250 mm | D16 – 150 |
| | Arah Y | D19 – 100 mm | D19 – 250 mm | |
| PC5 (1400 x 2000) | Arah X | D19 – 100 mm | D19 – 250 mm | D16 – 150 |
| | Arah Y | D19 – 100 mm | D19 – 250 mm | |

4.8 Permodelan 3D

Permodelan tiga dimensi (3D) pada penelitian ini disusun sebagai representasi akhir dari struktur bangunan berdasarkan hasil analisis dan perencanaan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya. Model yang dibuat mencerminkan konfigurasi struktur yang telah ditetapkan, meliputi dimensi elemen, properti material, serta sistem struktur yang digunakan, sehingga menggambarkan kondisi bangunan secara utuh setelah melalui proses desain.



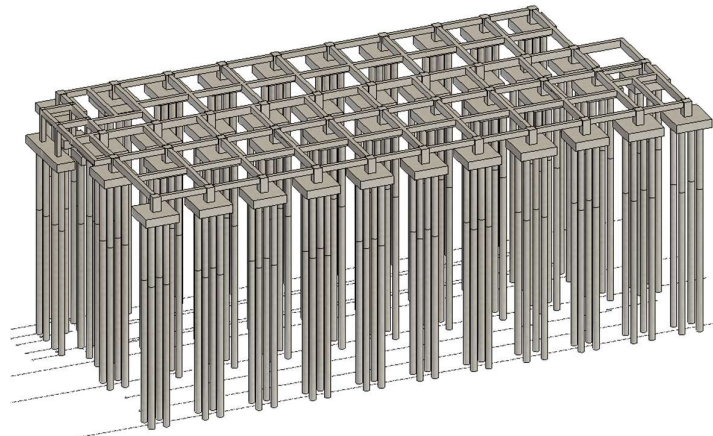
Gambar 4. 16 Permodelan Struktur SMP Negeri 15 Jakarta

Seluruh elemen struktur utama, seperti pondasi, *pile cap*, kolom, balok, dan pelat dimodelkan secara terintegrasi untuk memberikan visualisasi yang jelas terhadap susunan struktur serta keterkaitan antar elemen. Permodelan ini juga berfungsi sebagai sarana verifikasi akhir terhadap kesesuaian hasil perencanaan, sekaligus menjadi dasar dalam penyajian detail elemen struktur, termasuk penulangan pada masing-masing komponen.

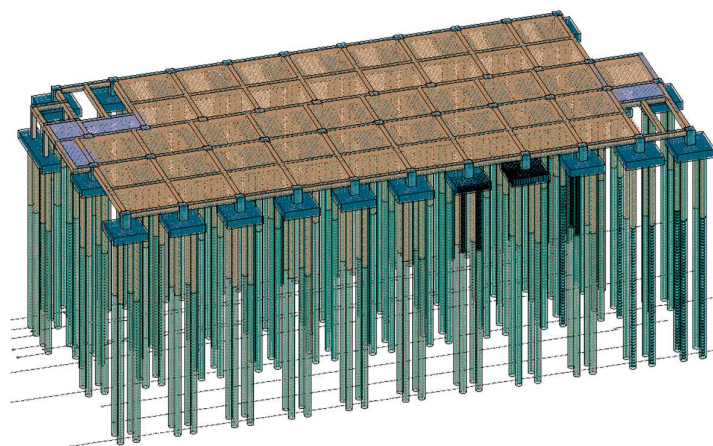
4.8.1 Permodelan Struktur Bawah

Pada subbab ini disajikan pemodelan struktur bawah yang meliputi *bored pile*, *pile cap*, serta *tie beam* yang dimodelkan secara terintegrasi. Pemodelan ini bertujuan untuk memberikan visualisasi yang jelas terhadap hubungan dan keterkaitan antar

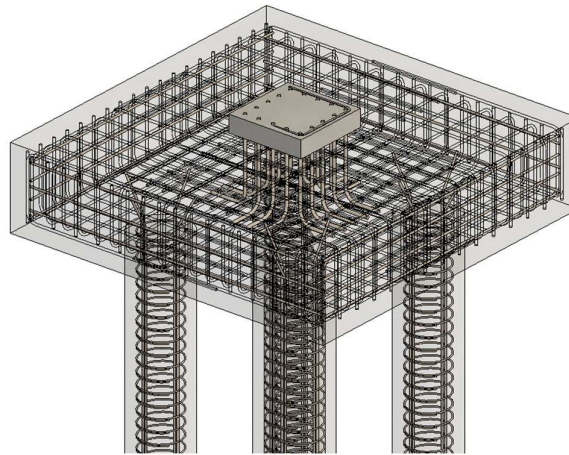
elemen dalam sistem pondasi, khususnya dalam menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah dasar. *Bored pile* dimodelkan sebagai elemen pondasi dalam yang berfungsi menahan beban, sedangkan *pile cap* berperan sebagai pengikat kepala tiang dan pendistribusi beban ke beberapa titik pondasi. *Tie beam* dimodelkan sebagai elemen pengikat antar *pile cap* untuk meningkatkan kestabilan struktur dan mengurangi potensi perbedaan penurunan. Selain itu, pemodelan juga mencakup detail penulangan pada masing-masing elemen sebagai bentuk representasi dari hasil perencanaan, sekaligus sebagai dasar dalam penyusunan detail gambar kerja struktur.



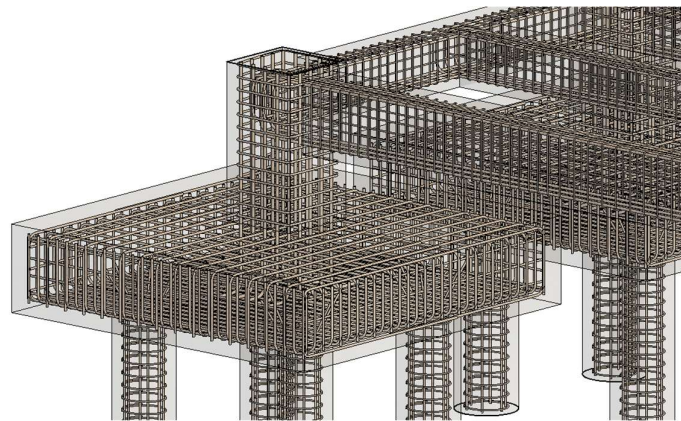
Gambar 4. 17 Permodelan Struktur Bawah SMP Negeri 15 Jakarta



Gambar 4. 18 Permodelan Penulangan Struktur Bawah SMP Negeri 15 Jakarta



Gambar 4. 19 Permodelan Penulangan *Pile cap* dan *Bored Pile* SMP Negeri 15 Jakarta

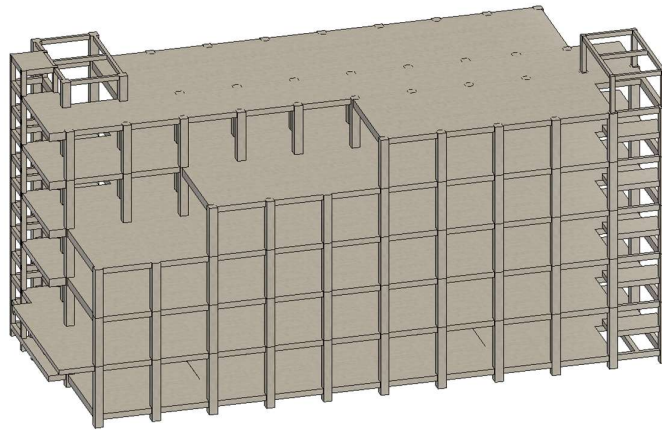


Gambar 4. 20 Permodelan Penulangan *Tie Beam* SMP Negeri 15 Jakarta

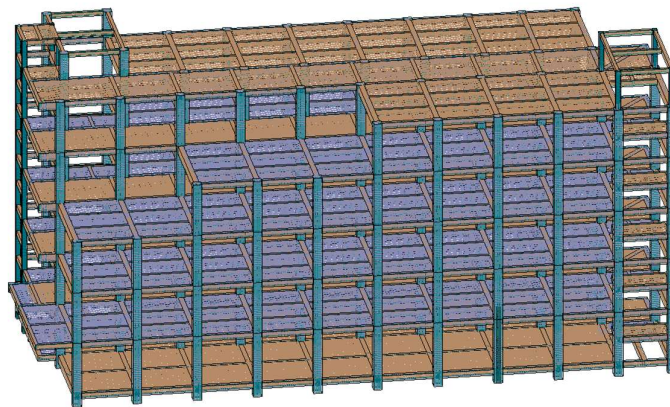
4.8.2 Permodelan Struktur Atas

Pada sub bab ini disajikan pemodelan struktur atas yang meliputi kolom, balok, dan pelat yang dimodelkan secara terintegrasi. Pemodelan ini bertujuan untuk memberikan visualisasi yang jelas terhadap hubungan dan keterkaitan antar elemen dalam sistem struktur, khususnya dalam menyalurkan beban dari pelat ke balok, kemudian ke kolom, hingga diteruskan ke struktur bawah. Kolom dimodelkan sebagai elemen vertikal yang berfungsi menahan dan meneruskan beban aksial, sedangkan balok berperan sebagai elemen horizontal yang mendistribusikan beban

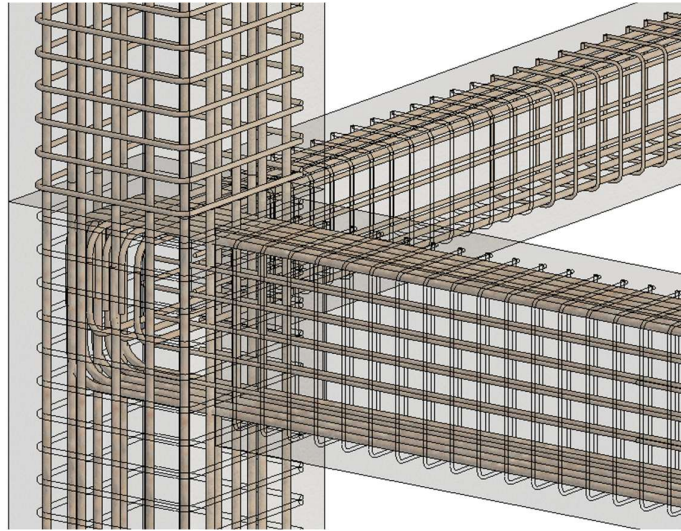
dari pelat ke kolom. Pelat dimodelkan sebagai elemen bidang yang menerima langsung beban gravitasi. Selain itu, pemodelan juga mencakup detail penulangan pada masing-masing elemen sebagai bentuk representasi dari hasil perencanaan, sekaligus sebagai dasar dalam penyusunan detail gambar kerja struktur.



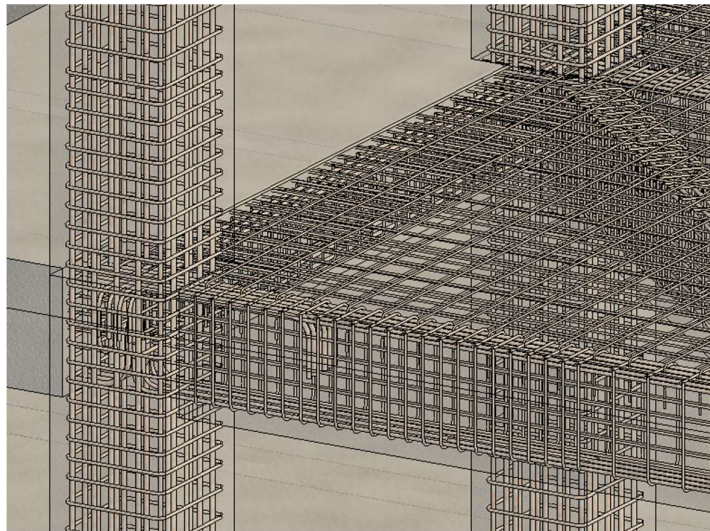
Gambar 4. 21 Permodelan Struktur Atas SMP Negeri 15 Jakarta



Gambar 4. 22 Permodelan Penulangan Struktur Atas SMP Negeri 15 Jakarta



Gambar 4. 23 Permodelan Penulangan Kolom-Balok SMP Negeri 15 Jakarta



Gambar 4. 24 Permodelan Penulangan Pelat-Balok SMP Negeri 15 Jakarta

4.9 Rancangan Anggaran Biaya (RAB)

4.9.1 Analisa *Quantity Take Off* (QTO)

Analisa *Quantity Take Off* (QTO) dilakukan untuk memperoleh volume pekerjaan dari setiap elemen struktur yang telah dimodelkan. Perhitungan kuantitas ini

<Perencanaan Kolom>

| A | B | C |
|-------------------------|---------------------|------------|
| Family and Type | Volume | Base Level |
| Concrete-Rectangul | 0.26 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.26 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.26 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.26 m ³ | LANTAI DAK |
| LANTAI DAK: 4 | 1.03 m ³ | |
| 0.26 m ³ : 4 | 1.03 m ³ | |
| Concrete-Rectangul | 0.37 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.37 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.37 m ³ | LANTAI DAK |
| Concrete-Rectangul | 0.37 m ³ | LANTAI DAK |
| LANTAI DAK: 4 | 1.47 m ³ | |
| 0.37 m ³ : 4 | 1.47 m ³ | |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 2 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 2 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 2 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 2 |
| LANTAI 2: 4 | 1.96 m ³ | |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 3 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 3 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 3 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 3 |
| LANTAI 3: 4 | 1.96 m ³ | |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 4 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 4 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 4 |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 4 |
| LANTAI 4: 4 | 1.96 m ³ | |
| Concrete-Rectangul | 0.49 m ³ | LANTAI 5 |

Gambar 4. 26 Quantity Take Off Kolom

| <QTO PELAT> | | | |
|------------------|---------------------|-------------------|----------|
| A | B | C | D |
| Family and Type | Volume | Area | Level |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 1.99 m ³ | 13 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 1.99 m ³ | 13 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 1.99 m ³ | 13 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 1.99 m ³ | 13 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.56 m ³ | 17 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.26 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |
| Floor: S1 150 mm | 2.27 m ³ | 15 m ² | LANTAI 1 |

Gambar 4. 30 *Quantity Take Off Pelat*

Berdasarkan hasil *quantity take off* yang diperoleh dari pemodelan BIM 3D, dilakukan rekapitulasi kebutuhan material pada masing-masing elemen struktur. Rekapitulasi ini meliputi volume beton, luas bekisting, serta berat tulangan untuk elemen kolom, balok, pelat, *pile cap*, dan *bored pile*. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses estimasi kebutuhan material dan analisis biaya pekerjaan struktur secara keseluruhan. Adapun hasil rekapitulasi *quantity take off* dapat dilihat pada **Tabel 4.55**.

Tabel 4. 55 Rekapitulasi *Quantity Take Off*

| No | Elemen | Volume Beton (m^3) | Luas Bekisting (m^2) | Berat Tulangan (Kg) |
|----|------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
| 1 | Kolom | 381,43 | 2419,21 | 25983,49 |
| 2 | Balok | 537,52 | 4815,91 | 35933,11 |
| 3 | Pelat | 466,69 | 3388 | 3569,93 |
| 4 | <i>Pilecap</i> | 261,04 | 373,52 | 38786,98 |
| 5 | <i>Boredpile</i> | 595,48 | - | 40497,2 |

4.9.2 Rancangan Anggaran Biaya (RAB)

Berdasarkan hasil perhitungan Rancangan Anggaran Biaya (RAB) yang telah disusun, diperoleh total biaya pekerjaan struktur sebesar Rp.12.104.107.759,81. Apabila dibandingkan dengan RAB eksisting sebesar Rp.18.821368.990,00, terdapat selisih biaya sebesar Rp.6.717.261.230,19. Selisih tersebut setara dengan penghematan sebesar 35,69% terhadap total RAB eksisting, yang menunjukkan adanya peningkatan efisiensi biaya pada perencanaan yang dilakukan. Dengan demikian, RAB hasil perencanaan ini dapat dinyatakan lebih ekonomis tanpa mengurangi tujuan utama pelaksanaan pekerjaan, serta dapat dijadikan sebagai acuan dalam perencanaan dan pengendalian biaya proyek agar tetap efektif dan sesuai dengan anggaran yang telah ditetapkan. Perbedaan nilai biaya tersebut juga dipengaruhi karena pada perencanaan ini tidak memasukkan biaya Rencana Keselamatan dan Kesehatan Kerja Kontrak (RK3K) ke dalam perhitungan RAB.

| N0 | URAIAN PEKERJAAN | JUMLAH HARGA (Rp.) |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | PEKERJAAN PERSIAPAN | |
| | Pekerjaan Persiapan | 256.028.676,53 |
| 2 | PEKERJAAN STRUKTUR BAWAH | |
| | Pekerjaan Boredpile | 2.359.388.022,87 |
| | Pekerjaan Pilecap | 1.242.861.270,79 |
| | Pekerjaan Tiebeam | 570.674.902,08 |
| 3 | PEKERJAAN STRUKTUR ATAS | |
| | Pekerjaan Pelat | 2.459.836.469,15 |
| | Pekerjaan Kolom | 2.534.350.922,26 |
| | Pekerjaan Balok | 2.680.967.496,13 |
| TOTAL | | 12.104.107.759,81 |

Gambar 4. 31 Rencana Anggaran Biaya SMP 15 Negeri Jakarta

4.10 Penjadwalan

4.10.1 Kurva S

Kurva S pada penelitian ini disusun sebagai bentuk penyajian hasil penjadwalan proyek yang telah direncanakan. Kurva ini menggambarkan hubungan antara waktu pelaksanaan dengan progres kumulatif pekerjaan selama periode proyek berlangsung. Berdasarkan hasil penjadwalan yang telah dilakukan, total durasi pelaksanaan pekerjaan adalah selama 16 minggu dimana nilai ini sama dengan penjadwalan gedung eksisting, yang mencakup seluruh tahapan pekerjaan mulai dari persiapan, struktur bawah, struktur atas, hingga finishing. Penyajian dalam bentuk Kurva S bertujuan untuk memberikan gambaran distribusi progres pekerjaan terhadap waktu, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam pengendalian dan evaluasi pelaksanaan proyek.

Kurva S hasil penjadwalan proyek disajikan pada lampiran 4 sebagai bentuk visualisasi hubungan antara waktu pelaksanaan dan progres kumulatif pekerjaan selama proyek berlangsung. Penyajian tersebut digunakan untuk menggambarkan distribusi perkembangan pekerjaan dari awal hingga akhir pelaksanaan proyek.

4.10.2 NWP (*Network Planning*)

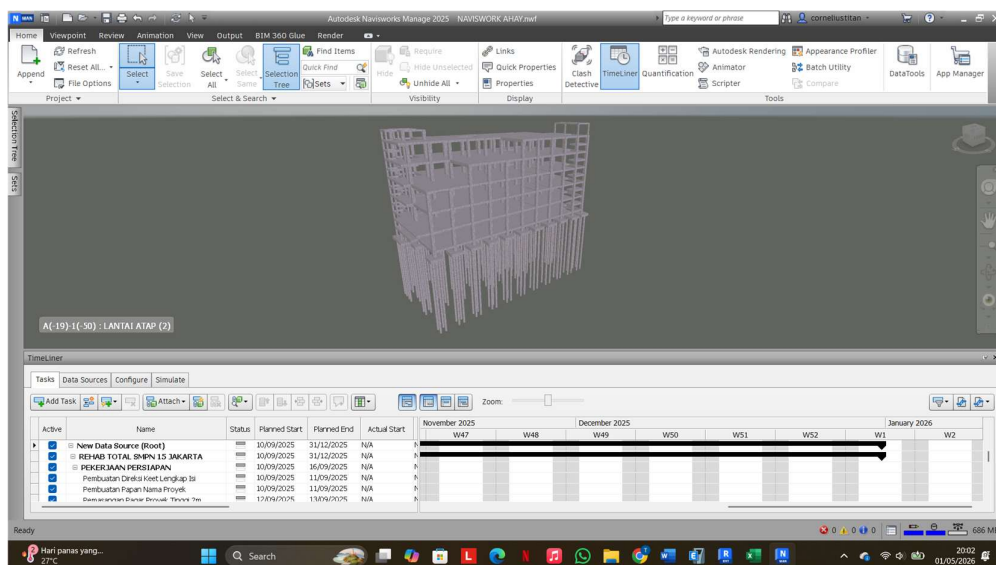
Perencanaan jaringan kerja (*Network Planning/NWP*) merupakan salah satu tahapan penting dalam penjadwalan proyek yang bertujuan untuk mengatur urutan serta keterkaitan antar aktivitas pekerjaan secara sistematis. Melalui NWP, hubungan ketergantungan antar pekerjaan dapat diidentifikasi dengan jelas, sehingga alur pelaksanaan proyek menjadi lebih terstruktur dan efisien. Pada penelitian ini, penyusunan NWP dilakukan dengan bantuan *Microsoft Project* untuk mempermudah dalam menentukan hubungan antar aktivitas, durasi pekerjaan, serta analisis jalur kritis (*critical path*). NWP yang dihasilkan digunakan sebagai dasar dalam penyusunan penjadwalan proyek pembangunan SMK Negeri 15 Jakarta, sehingga pelaksanaan pekerjaan dapat direncanakan secara optimal dan sesuai dengan target waktu yang telah ditetapkan.

Diagram *Network Planning* (NWP) pada penelitian ini disajikan pada lampiran 5 sebagai bentuk perencanaan urutan dan keterkaitan antar aktivitas pekerjaan. Penyajian NWP bertujuan untuk menunjukkan alur pelaksanaan pekerjaan serta hubungan ketergantungan antar kegiatan dalam proyek.

4.11 Integrasi *Building Information Modelling* (BIM)

4.11.1 4D *Simulation*

4D *simulation* merupakan proses integrasi antara model tiga dimensi (3D) dengan dimensi waktu (penjadwalan) untuk memvisualisasikan tahapan pelaksanaan konstruksi. Pada penelitian ini, simulasi 4D dilakukan menggunakan *Autodesk Navisworks* dengan menghubungkan model struktur yang telah dibuat dengan data penjadwalan proyek. Melalui simulasi ini, urutan pekerjaan struktur, durasi, serta tahapan pelaksanaan dapat divisualisasikan secara kronologis. Hasil 4D *simulation* ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai proses pembangunan struktur serta membantu dalam mengevaluasi kesesuaian antara perencanaan waktu dan pelaksanaan pekerjaan.



Gambar 4. 32 Integrasi *Building Information Modelling* (BIM) 4D